

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Профиль Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Частотно-регулируемый электропривод механизма передвижения козлового крана

УДК 62-83-523:621.873.1

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г4Б1	Твердоступ Сергей Александрович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Гусев Н.В	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Мелик-Гайказян М.В.	К.Э.Н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Гуляев М.В.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

И. о. руководителя ОЭЭ ИШЭ	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ивашутенко А.С.	К.Т.Н.		

Планируемые результаты обучения по ООП

Код результата	Результат обучения
Р 1	Применять соответствующие гуманитарные, социально-экономические, математические, естественно-научные и инженерные знания, компьютерные технологии для решения задач расчета и анализа <i>электрических устройств, объектов и систем</i> .
Р 2	Уметь формулировать задачи в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> , анализировать и решать их с использованием всех требуемых и доступных ресурсов.
Р 3	Уметь проектировать <i>электроэнергетические и электротехнические системы и их компоненты</i> .
Р 4	Уметь планировать и проводить необходимые экспериментальные исследования, связанные с определением параметров, характеристик и состояния <i>электрооборудования, объектов и систем электроэнергетики и электротехники</i> , интерпретировать данные и делать выводы.
Р 5	Применять современные методы и инструменты практической инженерной деятельности при решении задач в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
Р 6	Иметь практические знания принципов и технологий <i>электроэнергетической и электротехнической</i> отраслей, связанных с особенностью проблем, объектов и видов профессиональной деятельности профиля подготовки на предприятиях и в организациях – потенциальных работодателях.
Р 7	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
Р 8	Использовать навыки устной, письменной речи, в том числе на иностранном языке, компьютерные технологии для коммуникации, презентации, составления отчетов и обмена технической информацией в областях <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
Р 9	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена или лидера команды, в том числе междисциплинарной, в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
Р 10	Проявлять личную ответственность и приверженность нормам профессиональной этики и нормам ведения комплексной инженерной деятельности.
Р 11	Осуществлять комплексную инженерную деятельность в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> с учетом правовых и культурных аспектов, вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.
Р 12	Быть заинтересованным в непрерывном обучении и совершенствовании своих знаний и качеств в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .

Инженерная школа энергетики

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Профиль Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений

УТВЕРЖДАЮ:

И. о. руководителя ОЭЭ ИШЭ

_____ А.С. Ивашутенко
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г4Б1	Твердоступу Сергею Александровичу

Тема работы:

Частотно-регулируемый электропривод механизма передвижения козлового крана	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 3483/с от 06.05.2019г

Срок сдачи студентом выполненной работы:	31.05.2019г.
--	--------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе: <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Двухдвигательный электропривод механизма передвижения козлового крана; - Нагрузка – реактивная; - Режим работы – повторно-кратковременный; - Обеспечение синхронизации скоростей вращения двух приводов при изменении нагрузки.
---	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Изучить технологический процесс; - Выбрать преобразователь частоты и двигатель; - Рассчитать статические характеристики электродвигателей; - Разработать имитационную модель электропривода; - Исследовать возможности синхронизации скоростей двух приводов.
Перечень графического материала:	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы:	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Мелик-Гайказян Мария Вигеновна
Социальная ответственность	Гуляев Милий Всеволодович

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	05.04.2019г.
---	--------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Гусев Н.В	к.т.н.		05.04.2019г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г4Б1	Твердоступ Сергей Александрович		05.04.2019г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Профиль Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений

Период выполнения весенний семестр 2018 /2019 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	30.05.2019г.
--	--------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
23.05.2019	Основная часть	60
15.05.2019	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
17.05.2019	Социальная ответственность	20

СОСТАВИЛ:

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Гусев Н.В	К.Т.Н.		

СОГЛАСОВАНО:

И. о. руководителя ОЭЭ ИШЭ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ивашутенко А.С.	К.Т.Н.		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 114 листов, 29 рисунка, 16 таблицы, 41 источник, приложение.

Ключевые слова: двухдвигательный электропривод, частотно-регулируемый, электропривод, кран козловой, управление векторное, выравнивание нагрузки.

Актуальность работы: Механизм передвижения крана козлового должен обеспечить синхронное вращение двух электроприводов даже при изменении нагрузки для него нужно разработать модель двухдвигательного электропривода

Объектом исследования является электропривод двухдвигательный механизма козлового крана его передвижения.

Задачи и цели работы состоят в исследовании и разработке двухдвигательной системы управления с частотными преобразователями и с датчиками по связям обратным, обеспечивающей вращение согласованное, при котором будет реализовываться движение равномерное опор крана козлового.

Работа состоит из пяти разделов, так же введение, и заключение, представлен список использованных источников.

В процессе работы провели исследования электропривода двухдвигательного частотно-регулируемого.

По результатам исследования была обоснована адекватность имитационных моделей, так же получены параметры настройки данной системы которая обеспечивает синхронизации скоростей при работе вращения двух приводов и при изменении нагрузки.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word. Так же были использованы: среда имитационного моделирования – Matlab, система компьютерной алгебры – MathCad .

Оглавление

Введение	9
1 Технологический процесс	11
1.1 Назначение и технические характеристики козлового крана ЛТ-62	11
1.2 Кинематические особенности козловых кранов	16
1.3 Требования, предъявляемые к электроприводу механизма горизонтального передвижения	18
1.4 Обзор существующих систем управления электроприводами механизмов передвижения козловых кранов	20
1.5 Особенности двухдвигательного электропривода	23
2 Выбор оборудования и расчет электропривода механизма передвижения козлового крана	25
2.1 Выбор двигателя	25
2.2 Расчет параметров схемы замещения асинхронного двигателя	32
2.3 Выбор преобразователя частоты	36
2.4 Расчет естественных характеристик электропривода	39
2.5 Расчет статических характеристик двигателя и элементов силового канала и нагрузки электропривода при частотном векторном управлении	42
2.6 Параметры, структурные схемы и модели системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель	44
3 Оптимизация контуров регулирования	47
3.1 Оптимизация контура тока с ПИ-регулятором	47
3.1.1 Параметры настройки контура тока с ПИ-регулятором	48
3.2 Оптимизация контура потокосцепления с ПИ-регулятором	49
3.2.1 Параметры настройки контура потокосцепления с ПИ-регулятором	51
3.3 Оптимизация контура скорости с ПИ-регулятором	52
3.3.1 Параметры настройки контура потокосцепления с ПИ-регулятором	53
4 Разработка имитационной модели электропривода	55
4.1 Математическая модель асинхронного двигателя	55
4.2 Механическая часть электропривода механизма передвижения козлового крана	58
4.3 Проверка адекватности разработанной модели асинхронного двигателя	60
4.4 Исследование способов управления для электропривода системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель»	61
4.4.1 Скалярное управление	62
4.4.2 Векторное управление с обратной связью по скорости одного двигателя	64
4.4.3 Векторное управление с обратной связью по скорости каждого асинхронного двигателя	67
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»	71

5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	72
5.1 SWOT-анализ работы частотно-регулируемого электропривода механизма передвижения козлового крана	72
5.2 Организация работ технического проекта	75
5.2.1 Структура работ в рамках технического проектирования	75
5.2.2 Определение трудоемкости выполнения ТП	76
5.2.3 Разработка графика проведения технического проекта	77
5.3 Составление сметы затрат на разработку ТП	80
5.3.1 Расчет материальных затрат	80
5.3.2 Расчет полной заработной платы исполнителей темы	81
5.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	82
5.3.4 Накладные расходы	83
5.4 Формирование сметы затрат технического проекта	83
5.5 Определение ресурсоэффективности проекта	84
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»	87
6 Социальная ответственность	89
6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	90
6.2 Производственная безопасность	91
6.2.1 Анализ потенциально возможных вредных факторов проектируемой производственной среды	91
6.2.2 Анализ потенциально возможных опасных факторов проектируемой производственной среды	94
6.3 Экологическая безопасность	96
6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	98
Заключение	100
Список используемой литературы	102
Приложение А	106

Введение

Подъемно-транспортные механизмы, представляют собой большую группу механизмов общепромышленного назначения, выполняющих разнообразные погрузочно-разгрузочные операции. К ним относятся краны - мостовые, козловые, башенные, поворотные и т.д. Среди этих механизмов в наиболее тяжелых условиях и интенсивных режимах работают козловые краны.

Козловые краны оснащены системами двухдвигательного электропривода. В их числе привода, обеспечивающие горизонтальное передвижение самого крана. Таковыми являются механизмы передвижения.

Привода устанавливаются у основания стоек, представляющих собой несущую часть крана. Основным требованием к данному механизму является согласованное передвижение опор козлового крана при одинаковой скорости вращения электроприводов. Поэтому, на основе данного требования, необходимо применение специальной системы согласования приводов. Механизмы передвижения являются единственными, где необходима система согласования или синхронизации. [1, 2, 3]

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Выбрать электродвигатель и преобразователь частоты, рассчитать параметры схемы замещения и получить механические и электромеханические характеристики электродвигателя.

2. Разработать модель в программной среде Simulink Matlab, позволяющую имитировать двухдвигательный электропривод механизма передвижения козлового крана, включая два преобразователя частоты, два двигателя, реактивную нагрузку, контура обратных связей.

3. Провести исследования имитационной модели двухдвигательного асинхронного частотно-регулируемого электропривода в различных режи-

мах работы: различной нагрузке и задании скорости. Подобрать коэффициенты для компенсаций момента и скольжения для выравнивания нагрузки для двигателей с различными параметрами.

4. Произвести расчет и анализ технико-экономических показателей, рассчитать годовой экономический эффект.

5. Определить и проанализировать опасные и вредные факторы сред. Рассмотреть негативные воздействия на окружающую среду, чрезвычайные ситуации, которые могут возникнуть при эксплуатации электропривода козлового крана.

1 Технологический процесс

1.1 Назначение и технические характеристики козлового крана ЛТ-62

В данное время, козловые краны являются одним из основных средств механизации перегрузочных и складских работ в различных отраслях народного хозяйства. Козловые краны относят к кранам мостового типа, входящих в группу подъемно-транспортных машин, отличающихся кратковременным и повторно-кратковременным режимами работы электроприводов.

По назначению козловые краны делятся на три основные группы: общего назначения (перегрузочные), строительно-монтажные и специального назначения.

Козловые краны используют для обслуживания открытых складов и погрузочных площадок, монтажа сборных строительных сооружений и оборудования, промышленных предприятия, обслуживания гидротехнических сооружений и выполнения погрузочно-разгрузочных работ на контейнерных площадках железнодорожных станций с температурой рабочей среды от -40 до + 40 градусов; грузоподъемность их, как правило, 3,2...50 т.; пролеты 10...40 м; высота подъема груза в зависимости от условий загрузки-разгрузки транспортных средств или штабелирования грузов 7..16 м. [5, 6]

В семействе козловых подъемных устройств достойное место занимает уникальный по своему применению кран козловой ЛТ 62.

Козловой кран ЛТ-62 (рисунок 1) получил широкое применение на нижних лесных складах на разгрузке хлыстов с лесовозного транспорта и создании запасов. [5, 6]

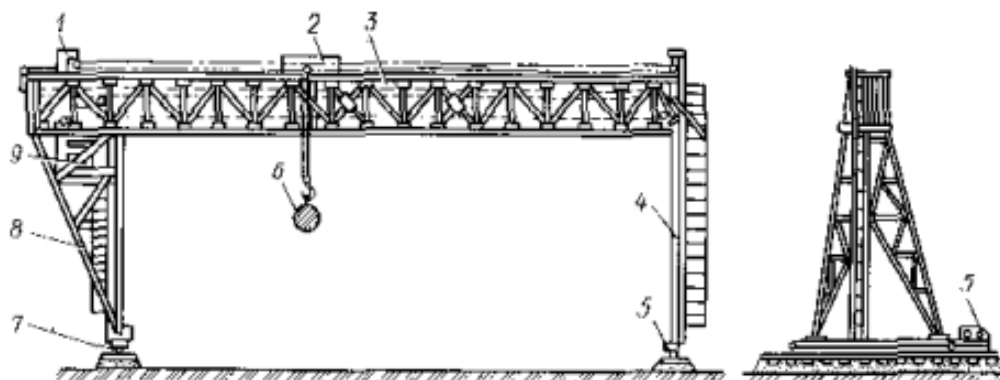


Рисунок 1 – Козловой кран ЛТ-62

Несущая ферма 3 козловых кранов расположена на высоких опорах – жесткой 8 и шарнирной 4, ноги которых опираются на ходовые тележки 5 и 7, передвигающиеся по крановым путям. Шарнирность присоединения верхнего конца опоры 4 к несущей ферме компенсирует забегание одной опоры по отношению к другой, а также некоторые неточности в прокладке пути. Грузовая тележка 2 при помощи лебедки 1 передвигается вдоль несущей фермы. У большинства подобных кранов для подъема и опускания груза служат две лебедки, расположенные по концам несущей фермы. Кабина крановщика 9 располагается в верхней части жесткой опоры.

Груз 6 можно перемещать по трем направлениям: по вертикали – при работе грузоподъемного механизма; в пределах пролета (расстояние между опорами) крана – при движении грузовой тележки и вдоль подкрановых путей – при передвижении крана. Штабеля размещают в пролете крана.

Вдоль несущей фермы прокладывают пути для перемещения грузовой тележки; пути располагают либо поверх несущей фермы, либо под ней. В первом случае путь является рельсовым, во втором путепроводом служит двутавровая балка, которая крепится к нижнему поясу фермы.

Механизм подъема и опускания груза у козловых кранов состоит из грузовой лебедки и канатоблочной системы, включающей полиспаст с крюковой обоймой. Грузовая лебедка размещается по двум вариантам: непосредственно на грузовой тележке или на несущей ферме. У некоторых

моделей козловых кранов большой грузоподъемности устанавливают две грузовые лебедки, располагаемые по концам несущей фермы.

Схема запасовки канатов грузоподъемного механизма, имеющего две грузовые лебедки, состоит из двух одинаковых канатоблочных систем с приводом от однобарабанных лебедок.

Грузовая тележка представляет собой раму, имеющую ходовые колеса. На тележке расположены неподвижные блоки полиспаста и у некоторых моделей кранов грузовая лебедка. В зависимости от расположения пути грузовой тележки (поверх несущей фермы или под ней) она или опирается на ходовые колеса, или подвешивается к ним. В первом случае тележка имеет два полиспаста, ветви которых свешиваются по обе стороны несущей фермы.

Для передвижения грузовой тележки служит однобарабанная реверсивная лебедка, устанавливаемая в конце несущей фермы, обычно над жесткой опорой. На барабане лебедки закреплены концы обеих ветвей тягового каната. Одна ветвь закреплена с одной стороны грузовой тележки, вторая – огибает направляющий блок и крепится к тележке, с другой стороны. Благодаря тому, что направление намотки на барабан ветвей тягового каната различно, одна из ветвей при включении барабана наматывается, а другая – разматывается, в результате чего грузовая тележка перемещается по несущей ферме. Изменить направление движения тележки можно путем реверсирования электродвигателя лебедки. Для точной остановки грузовой тележки тяговая лебедка оборудована электромагнитным тормозом. По концам пути тележки установлены тупиковые упоры. На грузовой тележке мостовых кранов размещены механизмы подъема груза и передвижения тележки, имеющие индивидуальные приводы. Оба механизма оборудованы колодочными тормозами и конечными выключателями, ограничивающими высоту подъема груза и ход тележки.

Механизм передвижения служит для горизонтального перемещения моста или всего крана. Козловые краны передвигаются по двум рельсам, опираясь на них четырьмя ходовыми тележками. На каждом рельсе (под одной опорой) располагается по две тележки (ведущая и ведомая). Ведущая тележка состоит из рамы, на которой размещены привод, ходовые колеса и противоугонный захват. Привод тележки состоит из электродвигателя, редуктора и расположенного между ними электромагнитного тормоза. На одной из ведущих тележек имеется конечный выключатель, ограничивающий передвижение крана. Противоугонный захват клещевого типа связывает тележку с рельсом в тех случаях, когда возникает опасность самопередвижения крана под действием ветровой нагрузки. К опоре крепятся нога крана.

Управление механизмами крана сосредоточено в кабине крановщика. Ее расположение должно обеспечить благоприятные условия для наблюдения за процессом работы. У козловых и некоторых моделей консольно-козловых кранов кабина расположена в верхней части жесткой опоры. Консольно-козловые краны чаще оборудованы передвижной кабиной, которая связана тягой с грузовой тележкой и передвигается вместе с ней по ездовой балке.

Для предупреждения аварий в системе управления крана имеется ряд блокировок, автоматически ограничивающих высоту подъема грузовой траверсы, а также выход грузовой тележки и самого крана за пределы рабочих участков. Блокировка двери кабины крановщика не допускает включения механизмов крана, если дверь кабины открыта. Козловые краны оборудованы устройством, регистрирующим ветровую нагрузку на конструкцию крана.

При ветре, сила которого становится опасной, т.к. может вызвать самопередвижение крана, включаются световой и звуковой сигналы. При этом работа на кране должна быть прекращена и включены противоугонные захваты.

Подача электроэнергии к козловым кранам обычно осуществляется по гибкому четырехжильному кабелю. Многие модели кранов оборудуются кабельным барабаном, механизмирующим намотывание и разматывание электрического кабеля при передвижении крана.

Электродвигатели козловых кранов получают питание от троллейных проводов, проложенных вдоль эстакады. Электроэнергия, поступающая к двигателям грузовой тележки, снимается с троллейных проводов, протянутых вдоль моста.

Козловые краны, у которых концы несущей фермы выступают за опоры в виде консолей, называются консольно-козловыми. У таких кранов штабеля можно дополнительно размещать под консолями, что увеличивает площадь, занятую штабелями, и позволяет при той же протяженности крановых путей создавать большой запас лесоматериалов. [5, 6]

Основные параметры и характеристики приведены в таблице 1. [5, 6]

Таблица 1 - Основные параметры и характеристики крана ЛТ-62

Наименование показателей	Норма
Грузоподъёмность номинальная, т	32
Наибольшая высота подъёма груза, м	11,8
Скорость подъёма груза, м/мин	$13,4 \pm 1,0$
Скорость передвижения тележки, м/мин	$32,6 \pm 1,0$
Скорость плавной посадки груза, м/мин	$12,0 \pm 1,0$
Скорость передвижения перегрузчика, м/мин	$51,0 \pm 2,0$
Установленная мощность, кВт, не более	129
Режим работы двигателей, ПВ %	средний 25
Длина пролёта, м:	40 – 0,04
Масса конструктивная, т	95,6

Технические данные канатов, установленных на перегрузчике, приведены в таблицу 2. [5, 6]

Таблица 2 - Технические данные канатов, установленных на перегрузчике

Наименование	Диаметр, мм	Длина пролёта 40 м	Обозначение
Канат грузовой (2 конца)	21,5	203	21,5-Г-В-Н-180 ГОСТ 3079-69
Тяговой канат передвижения тележки	15,0	126	15-Г-1-Н-170 ГОСТ 3081-69

Технические данные лебёдки грузовой, приведены в таблице 3. [5, 6]

Таблица 3 - Технические данные лебёдки грузовой

Наименование показателей	Норма
Тяговое усилие номинальное	Н – 3899
Тяговое усилие максимальное	Н – 4506
Диаметр каната	мм – 21,5
Диаметр барабана	мм – 571,5
Передаточное число редуктора	У2У-400Н-25-22М – 25

Технические данные механизма передвижения перегрузчика, представлены в таблице 4.

Таблица 4 - Технические данные механизма передвижения

Наименование показателей	Норма
Передаточное число редуктора	У2У-200-12,5-22 – 12,5
Передаточное число открытой зубчатой зубной пары	2,82
Общее передаточное число	35,4
Диаметр ходового колеса	мм – 600

1.2 Кинематические особенности козловых кранов

В механизмах передвижения кранов наибольшее распространение получил многодвигательный привод, при котором каждая концевая балка моста приводится в движение своим самостоятельным приводом, причем между приводами, расположенными на различных концевых балках, существуют связь, осуществляемой с помощью внешней системы согласования, кроме самой металлоконструкции. В результате обеспечивается одна функция – передвижения крана по рельсам. [1, 2, 3]

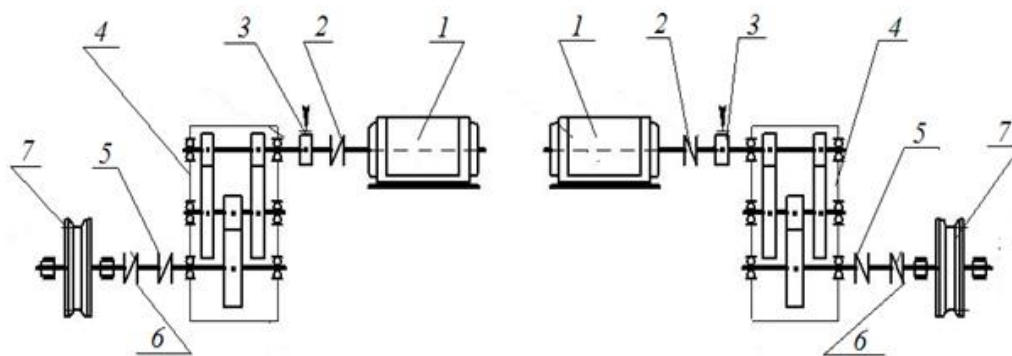


Рисунок 2 - Кинематическая схема механизма передвижения крана

Конструктивно механизмы передвижения выполняют в виде скрепляемых с основанием стоек опор одноколесных или балансирных тележек и, реже, ходовых балок, на которые попарно опираются две стойки. На рисунке 2 имеются два согласованно работающих механизма передвижения козлового крана. Каждый механизм включает в себя электродвигатель 1, соединенный муфтой 2 с редуктором 4, передает движения на ведущие колеса 7. Вал приводного колеса соединен с тихоходным валом редуктора промежуточным валом 6 и зубчатыми муфтами 5. На полумуфте быстроходного вала редуктора установлен тормоз 3.

Преимущества индивидуального привода заключаются в компактности всего механизма передвижения, меньших маховых моментах электродвигателей, в сокращении времени пуска.

В механизмах передвижения в качестве электроприводов используются электродвигатели постоянного тока и переменного тока. Но с усовершенствованием электроприводов, применение двигателей на постоянном токе осталось позади. Сегодня широкое распространение получили асинхронные электродвигатели с фазным и короткозамкнутым роторами.

Применяемые электродвигатели рассчитывают для эксплуатации в повторно-кратковременном режиме, который характеризуется продолжительностью включения (ПВ) 15, 25, 40 и 60% при

продолжительности цикла не более 10 мин. Основным номинальным режимом крановых двигателей переменного тока является ПВ=40%. Таким образом, выбору типов электроприводов способствуют режимы работы механизмов, а также параметрические требования грузоподъемности. [1, 2, 3]

1.3 Требования, предъявляемые к электроприводу механизма горизонтального передвижения

К механизмам горизонтального перемещения относят механизмы передвижения кранов и грузовых тележек, а также механизмы поворота. Все эти механизмы имеют реактивный (т.е. не зависящий от направления движения) момент нагрузки. [1, 7]

Идеальный электропривод механизма горизонтального перемещения должен обеспечивать жесткие механические характеристики (рисунок 3) в двигательном и тормозном режимах. В отличие от механизма подъема режим торможения механизмов горизонтального перемещения занимает лишь небольшое время цикла и возникает, как правило, при переходе с высших скоростей на низшие.

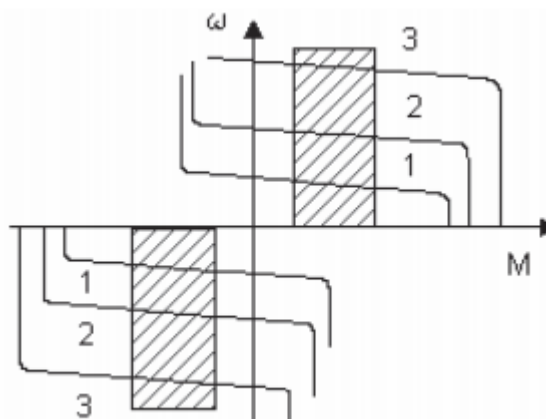


Рисунок 3 - Желаемые механические характеристики электропривода механизма горизонтального перемещения

В тормозном режиме электропривод механизмов горизонтального перемещения может работать также при движении под уклон (что бывает при неисправности рельсовых путей) или при движении по ветру.

Важнейшей особенностью механизмов передвижения и поворота является большая механическая инерция, влияние которой тем больше, чем тяжелее движущее сооружение и чем выше скорость движения, поэтому, во избежание повышенных динамических нагрузок на металлоконструкции и механизмы электропривод должен ограничивать ускорения при пуске и торможении. Приведенный к валу двигателя момент инерции движущихся масс установки для механизмов передвижения кранов в 2 - 20 раз больше собственного момента инерции двигателя. Поэтому для таких механизмов при большой частоте включений динамические нагрузки определяют необходимую мощность двигателя, а статические нагрузки невелики в сравнении с динамическими. [1, 7]

Масса перемещаемого груза, как правило, оказывает небольшое влияние на статический момент электропривода механизма передвижения, т.к. масса металлоконструкции крана обычно больше массы груза.

Алгоритм стопорения в электроприводах механизмов горизонтального перемещения проще, чем в электроприводах механизмов подъема. Из-за реактивного момента нагрузки снятие тормоза в большинстве случаев можно производить, не дожидаясь, пока момент электродвигателя возрастет до значения статического момента. Основным требованием является наложение тормоза при скорости, близкой к нулевой, для снижения динамических нагрузок и уменьшения износа тормозных накладок.

Однако эксплуатация козловых кранов под открытым небом, подвергается ветровой нагрузке, что в случае большой парусности может привести к значительному расширению пределов изменения статического момента сопротивления, при этом может измениться и знак момента. Ветровая нагрузка может иметь любое направление и при большой парусности пределы изменения статической нагрузки могут охватывать как двигательный, так и тормозной режимы. Диапазон регулирования скорости механизма, при заданной номинальной, определяется требуемой

пониженной скоростью. Наличие такой пониженной скорости, на которую переводится механизм перед остановкой, облегчает работу оператора, создает удобство управления и повышает точность остановки. [1, 7]

1.4 Обзор существующих систем управления электроприводами механизмов передвижения козловых кранов

В механизмах передвижения козловых кранов применение получили несколько видов систем управления: релейно-контакторные, дроссельные и частотно-регулируемые.

В данное время широко используемым типом электропривода для козловых кранов является электропривод на основе асинхронного двигателя с фазным ротором при реостатном управлении с помощью силовых контроллеров или простейших релейно-контакторных систем. Это связано с тем, что сроки службы кранов составляют десятки лет, а большинство кранов было выпущено в советское время. В данную систему также входит функция согласования механизмов передвижения. Использование релейно-контакторных систем управления, обусловлено условиями работы козловых кранов: троллейная система питания, высокое содержание электропроводящей пыли, влажность, загазованность, высокая температура и ее резкие колебания по длине пролета, высокая интенсивность работы крана, характеризующаяся большой продолжительностью и частотой включений. Однако, несмотря на ее широкое применение (путем электрического согласования роторов), она является неэффективной. [1]

Это связано со многими факторами. Во-первых, переключение ступеней пусковых сопротивлений в процессе разгона двигателя вызывает скачкообразные изменения его момента и броски токов в больших пределах, что усугубляется при снижении числа ступеней. Это может явиться причиной возникновения упругих механических колебаний и нарушить плавность протекания переходных процессов.

Во-вторых, при использовании систем многодвигательного электропривода для козловых кранов с относительно большим пролетом (25 метров) не одновременное замыкание контактов релейно-контакторной системы приводит к различным ускорениям каждого асинхронного двигателя с фазным ротором, что вызывает дополнительные динамические нагрузки в механизмах и металлоконструкции крана, и, в конечном счете, к снижению производительности и преждевременному выходу из строя элементов крана.

Наряду с релейно-контакторной системой в крановых механизмах используется дроссельная система. Она является более оптимальной в нерегулируемом электроприводе козлового крана. Использование пускового дросселя для ограничения тока ротора асинхронного двигателя в пусковых и тормозных режимах, обеспечивает плавность пуска и торможения механизмов при отсутствии системы управления ротором электродвигателя, сохраняя примерное постоянство момента до скорости 0,5-0,6 от синхронной. [1, 2]

Применение данной системы исключает из работы все активные сопротивления, релейно-контакторную схему управления и кабельную продукцию для подключения аппаратуры в цепь ротора, что до минимума упрощает схему электропривода механизма.

За счет обеспечения плавного разгона механизмов и особенно, плавного, но интенсивного торможения, резко увеличивается срок службы механических узлов (редукторов, муфт, валов, скатов, и т.д.). Полностью исключается "произвол" машиниста крана, т. к. выбранная при наладке интенсивность разгона и торможения механизмов остается неизменной. Но все же применение АД с ФР в настоящее время является неактуальным, что связано с дороговизной. [1, 2]

На основании вышеизложенного, для снижения динамических нагрузок и устойчивости работы механизма необходима оптимальная система регулирования электроприводами механизмов передвижения

козлового крана за счет модернизации существующих систем управления, либо за счет разработки новых систем. В результате должна повыситься долговечность и точность работы механизмов козлового крана с учетом всех предъявляемых к нему требований.

В настоящее время идет устойчивая тенденция перехода от нерегулируемых электроприводов козловых кранов, с релейно-контакторными, дроссельными системами, на регулируемые и эффективные по надежности электропривода. Это связано с активным применением в крановых механизмах преобразователей частоты с асинхронными короткозамкнутыми электродвигателями (АКЗ). [1, 2]

Частотное регулирование является наиболее эффективным способом регулирования скорости двигателя переменного тока, которое позволяет получить хорошие механические характеристики асинхронных двигателей.

Основными достоинствами этой системы регулируемого электропривода являются:

- плавность регулирования и высокая жесткость механических характеристик, что позволяет регулировать скорость в широком диапазоне;
- экономичность регулирования, определяемая тем, что двигатель работает с малыми величинами абсолютного скольжения, и потери в двигателе не превышают номинальных.

С применением частотно-регулируемых электроприводов в козловых кранах не разработаны математические модели двухдвигательного электропривода применительно к автоматизированному электроприводу механизма передвижения козлового крана при регулировании скоростей вращения двигателей с помощью полупроводниковых преобразователей по системе «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором» (ПЧ-АД), не произведен анализ эффективности способа управления для частотно-регулируемого электропривода. [1, 2]

Особенностью электроприводов горизонтального перемещения является то, что большинство из них реализуются как многодвигательные приводы. В этом случае электродвигатели могут питаться как от одного преобразователя частоты, что является наиболее экономичным вариантом, так и от индивидуальных преобразователей, обеспечивающих более гибкое управление крановыми механизмами. [7]

Питание двигателей от индивидуальных преобразователей представляется целесообразным для приводов механизмов передвижения мостовых и козловых кранов с большими пролетами. В этом случае благодаря большей гибкости управления возможно обеспечение выравнивания нагрузки между двигателями по схеме «ведущий-ведомый» (рисунок 4), синхронизации движения приводов с целью устранения перекоса моста крана и т.д.

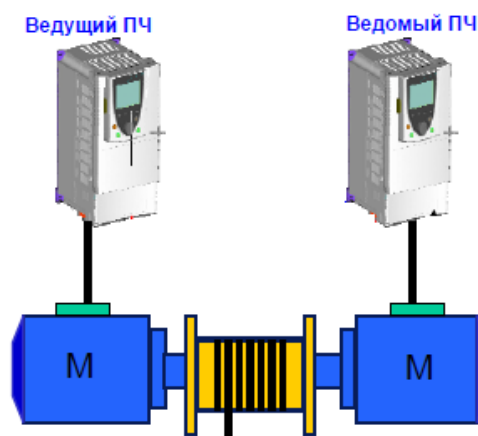


Рисунок 4 - Конфигурация «ведущий-ведомый»

1.5 Особенности двухдвигательного электропривода

Основное отличие многодвигательного электропривода от однодвигательного заключается в том, что силовой поток к ведомому звену передается не от одного, а от нескольких источников энергии (двигателей). Известно, что многодвигательный привод имеет ряд преимуществ перед однодвигательным, особенно в тяжелых технологических агрегатах. В теории электропривода отмечается, что многодвигательные электроприводы характеризуются большими возможностями в отношении

регулирования скорости и момента, взаимным резервированием мощности, снижением суммарного момента инерции системы по сравнению с системой однодвигательного электропривода, возможностью создания мощных установок при использовании серийных электрических машин относительно небольшой мощности, упрощением механического оборудования, лучшим конструктивным размещением электродвигателей.

Между тем практика эксплуатации многодвигательных электроприводов свидетельствует о том, что в некоторых механизмах возбуждаются интенсивные колебательные процессы в трансмиссиях, что в значительной степени перегружает, а в ряде случаев вызывает разрушение деталей привода.

Известно, что даже в однотипных двигателях их механические характеристики могут отличаться друг от друга вследствие различия сопротивления обмоток, магнитных потоков и др. Все это в значительной степени обуславливает возбуждение сложных колебательных процессов, которые являются причиной неравномерности угловых скоростей двигателей и неизбежного перераспределения нагрузок на каждый двигатель. Неравномерное распределение моментов между электродвигателями, приводит к перегрузке одного из них, а также к неравномерному износу элементов кинематической передачи – шестерен редукторов, шпинделей и пр. Таким образом одной из важных проблем двухдвигательных систем машинных агрегатов является обеспечение равномерного распределения нагрузок между двигателями как в статических, так и в динамических режимах.

В этой связи изучим вопрос о распределении нагрузок в статике, рассмотрев простейшую модель двухдвигательного электропривода. На рисунке 5 показано распределение нагрузок между двумя асинхронными электродвигателями, механические характеристики которых различаются по жесткости. Двигатель Д2 с более мягкой характеристикой оказывается менее загруженным. Если двигатели имеют одинаковый номинальный

момент, равный половине момента сопротивления, то один двигатель окажется недогруженным (Д2), а другой (Д1) перегруженным, что приведет при продолжительной работе к перегреву двигателя (Д1), вследствие чего он может выйти из строя. [7]

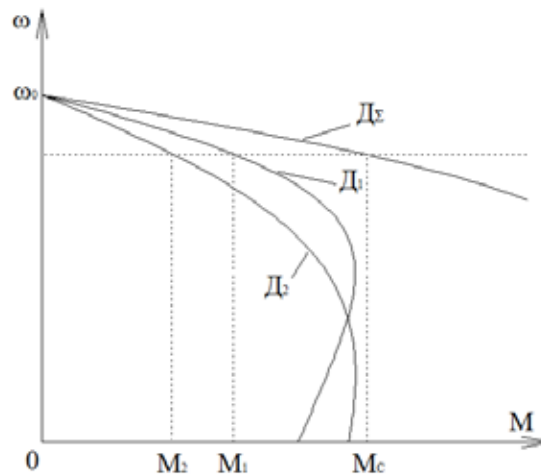


Рисунок 5 – Распределение нагрузок в приводе с двумя асинхронными электродвигателями.

На основании выше рассмотренного, в работе будет рассмотрен двухдвигательный асинхронный электропривод согласованного вращения механизмов передвижения козлового крана. Управление данными многодвигательными электроприводами будет осуществляться от отдельных преобразователей частоты.

Учитывая требования и специфику, предъявляемых к механизмам передвижения козловых кранов, необходимо добиться полной согласованности скоростей электроприводов и обеспечить оптимальные критерии разгона, торможения и устойчивости к любым динамическим воздействиям, связанных с неравномерностью распределения нагрузок.

2 Выбор оборудования и расчет электропривода механизма передвижения козлового крана

2.1 Выбор двигателя

Козловой кран ЛТ-62 предназначен для работы под открытым небом, поэтому выбор мощности двигателя основан на расчете усилий, возникающих в механизме, согласно. [5, 8, 9]

Изобразим нагрузочную диаграмму, которую должен выполнять заданный механизм для выполнения технологического цикла. Данные диаграммы в дальнейшем будут использоваться при исследовании имитационном проектировании.

Кран перемещается поперечно в одном направлении сначала массу m_1 в течение времени t_{p1} , затем массу m_2 в течение времени t_{p2} . Причем $t_{p1}=t_{p2}=t_p$. Между перемещениями грузов имеются равные паузы t_n для снятия и загрузки груза. Тогда нагрузочная диаграмма будет иметь вид (рисунок 6).

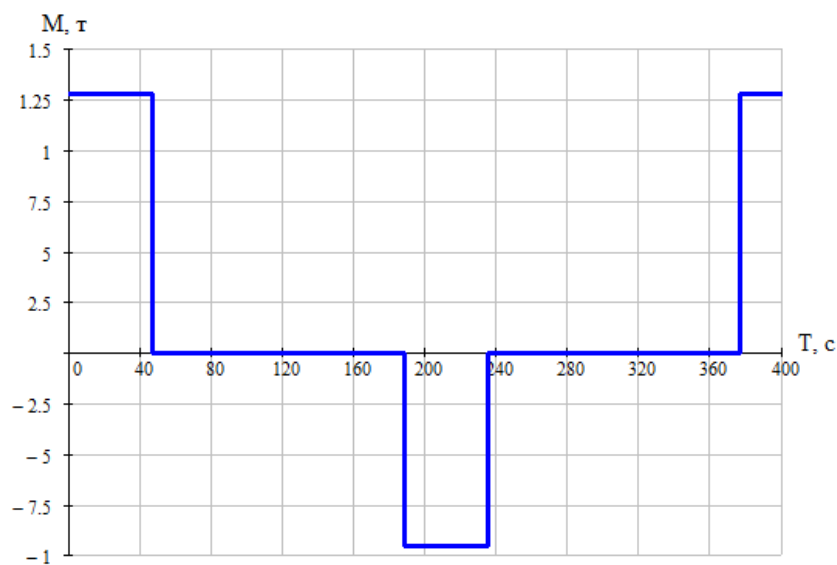


Рисунок 6 – Нагрузочная диаграмма

Массы m_1 и m_2 находим как

$$m_1 = m_n + m_{кр} = 32000 + 95600 = 127600 \text{ кг.} \quad (1)$$

$$m_2 = m_{кр} = 95600 \text{ кг.} \quad (2)$$

где m_n – грузоподъемность номинальная, т;

$m_{кр}$ – масса конструктивная, т.

Время работы t_p определим по величине перемещения L и номинальной скорости крана v_n

$$t_p = \frac{L}{v_n} = \frac{40 \times 60}{51} = 47,059 \text{ с.} \quad (3)$$

Цикл $t_{ц}$ определяется временем, поле которого процесс повторяется

$$t_{ц} = \frac{2 \times t_p}{ПВ} = \frac{2 \times 47,059}{0,25} = 376,471 \text{ с.} \quad (4)$$

Времена пауз t_n определяем по исходным данным механизма как

$$t_n = t_p \times \frac{1 - ПВ}{ПВ} = 47,059 \times \frac{1 - 0,25}{0,25} = 141,176 \text{ с.} \quad (5)$$

Суммарное время пауз

$$t_{\Sigma} = t_{ц} - 2 \times t_p = 376,471 - 2 \times 47,059 = 282,353 \text{ с.} \quad (6)$$

Определим мощности нагрузочной диаграммы. Схема приложения усилий для козлового крана представлена на рисунке 7.

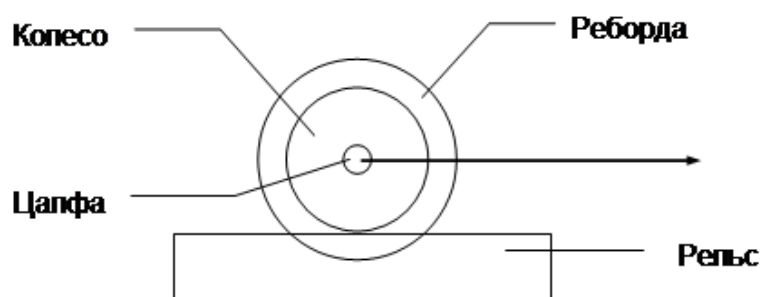


Рисунок 7 – Движение тележки по рельсовому пути

Усилие в этом случае определяется по формуле [8, 9]:

$$F = \frac{k_p \times m \times g \times (m_{ц} + f)}{R_k} \quad (7)$$

где m – суммарная масса перевозимого груза, кг;

R_k – радиус ходового колеса, м;

μ – коэффициент трения в подшипниках качения колес по рельсам,
принимается $\mu=0,02$;

f – коэффициент качения ходовых колес по рельсам,

принимаем $f=0,0004$;

k_p – коэффициент, учитывающий сопротивление от трения реборд о рельсы,

принимаем $k_p=2,5$;

$r_{ц}$ – радиус цапфы ходового колеса, м;

Для перемещения крана с грузом определим F_1 , согласно формуле (7)

$$F_1 = \frac{k_p \times m_1 \times g \times (m r_{ц} + f)}{R_k} = \frac{0,25 \times 27600 \times 9,81 \times (0,02 \times 0,6 + 0,0004)}{0,3} = 16680 \text{ Н.}$$

Для перемещения крана без груза определим F_2 , согласно выражению (7)

$$F_2 = \frac{k_p \times m_2 \times g \times (m r_{ц} + f)}{R_k} = \frac{0,25 \times 95600 \times 9,81 \times (0,02 \times 0,6 + 0,0004)}{0,3} = 12500 \text{ Н.}$$

При известной скорости v_n передвижения механизма, статическая мощность передвижения определяется как

$$P_{ст} = F \times v_n \quad (8)$$

Подставляя численные значения, получаем:

$$P_{ст1} = F_1 \times v_n = 16680 \times 0,85 = 14180 \text{ Вт,}$$

$$P_{ст2} = F_2 \times v_n = 12500 \times 0,85 = 10630 \text{ Вт.}$$

Найдем КПД передачи $\eta_{пер}$

$$\eta_{пер} = \frac{1}{\frac{1}{\eta_{пер.ном}} + \frac{a}{k_3} - a} \quad (9)$$

где $\eta_{пер.ном}$ – номинальный КПД кинематической схемы, равный произведению ее отдельных частей,

принимаем $\eta_{пер.ном}=0,92$;

a – коэффициент, применяемый равным 0,08;

k_3 – коэффициент загрузки

$$k_3 = \frac{m}{m_n + m_{кр}} \quad (10)$$

Выражение (10) для случая перемещения крана с грузом коэффициент загрузки

$$k_{31} = \frac{m_1}{m_H + m_{кр}} = \frac{127600}{32000 + 95600} = 1,0,$$

тогда

$$h_{пер1} = \frac{1}{\frac{1}{0,92} + \frac{0,8}{1,0} - 0,8} = 0,92.$$

Аналогично, из выражения (10) определяем параметры для режима перемещения крана без груза

$$k_{32} = \frac{m_2}{m_H + m_{кр}} = \frac{95600}{32000 + 95600} = 0,749,$$

тогда

$$h_{пер2} = \frac{1}{\frac{1}{0,92} + \frac{0,8}{0,749} - 0,8} = 0,738.$$

Определяем эквивалентную мощность

$$P_{\text{э}} (ПВ = 25\%) = \sqrt{\frac{P_{ст1}^2 \times t_{p1} + P_{ст2}^2 \times t_{p2}}{t_{p1} + t_{p2}}} = \sqrt{\frac{14180^2 \times 47,059 + 10630^2 \times 47,059}{47,059 + 47,059}} = \quad (11)$$

= 12530 Вт.

Определим мощность двигателя с учетом коэффициента запаса

$$P_{расч} = k_3 \times \frac{P_{\text{э}}}{h_{пер.ном}} = 1,35 \times \frac{12530}{0,92} = 18390 \text{ Вт.} \quad (12)$$

где k_3 – коэффициент запаса, учитывает дополнительный нагрев двигателя за время переходных процессов, который не учтен при предварительном выборе мощности, принимаем $k_3 = 1,35$;

Рассчитанную мощность при реальном ПВ приводим к мощности при стандартном $ПВ_{ст} = 40\%$

$$P_{\text{расч}} (ПВ = 40\%) = P_{\text{расч}} (ПВ = 25\%) \times \sqrt{\frac{25}{40}} = 18390 \times \sqrt{\frac{25}{40}} = 14540 \text{ Вт.} \quad (13)$$

Т.к. привод механизма передвижения крана отдельный, то выбираем двигатель приблизительно в два раза по мощности меньше расчетной. По каталогу, в соответствии с принятым $P_{\text{расч}}$, выбираем двигатель так чтобы $P_n > P_{\text{расч}}$.

По каталогу выбирается несколько электродвигателей ближайшей большей мощности с различными номинальными частотами вращения. [11]

Таблица 5 - Электродвигатели ближайшей большей мощности с различными номинальными частотами вращения

Тип двигателя	P_n , кВт	Частота вращения, об/мин	η_n , %	$\cos \varphi_n$	$J_{\text{дв}}$, кг·м ²
МТКН 311-8	7,5	690	80,5	0,63	0,281
АМТКФ132L6	7,5	900	87	0,87	0,085

Для каждого двигателя вычисляется передаточное отношение (число) редуктора

$$i_p = \frac{n_n}{n_{\text{max м}}}; \quad (14)$$

где n_n – номинальная частота вращения двигателя;

$n_{\text{max м}}$ – частота вращения производственного механизма;

$$n_{\text{max м}} = \frac{v_{\text{пер}}}{R_k \times 2 \times \varphi} = \frac{51}{0,3 \times 2 \times \varphi} = 27 \text{ об/мин.} \quad (15)$$

$$i_{p1} = \frac{n_{n1}}{n_{\text{max м}}} = \frac{690}{27} = 25,5;$$

$$i_{p2} = \frac{n_{n2}}{n_{\text{max м}}} = \frac{900}{27} = 33,3.$$

Для каждого двигателя определяется оптимальное, по условию минимизации времени пуска, передаточное отношение редуктора

$$i_{\text{оптр}} = \sqrt{\frac{J_M}{k \times J_{\text{дв}}}}. \quad (16)$$

где J_M - момент инерции производственного механизма;

$J_{дв}$ – момент инерции ротора двигателя;

k – коэффициент, учитывающий момент инерции редуктора;

принимая $k=1,3$.

$$i_{оптр1} = \sqrt{\frac{J_M}{k \times J_{дв1}}} = \sqrt{\frac{0,68}{1,3 \times 0,281}} = 1,36;$$

$$i_{оптр2} = \sqrt{\frac{J_M}{k \times J_{дв2}}} = \sqrt{\frac{0,68}{1,3 \times 0,085}} = 2,48.$$

Для каждого двигателя определяется отношение выбранного стандартного передаточного отношения редуктора к оптимальному передаточному отношению

$$Q = \frac{i_{оптр}}{i_{стр}}; \quad (17)$$

$$Q_1 = \frac{i_{оптр1}}{i_{стр1}} = \frac{1,36}{25} = 0,055;$$

$$Q_2 = \frac{i_{оптр2}}{i_{стр2}} = \frac{2,48}{31,5} = 0,079.$$

Промышленность выпускает одно-, двух- и трехступенчатые редукторы с передаточным числом из стандартного ряда [4, 12]: 1,0; 1,12; 1,25; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,24; 2,5; 2,8; 3,15; 3,55; 4,0; 4,5; 5,0; 5,6; 6,3; 7,1; 8,0; 9,0.

Необходимое стандартное передаточное отношение редуктора находим следующим образом:

$$i_{стр} = i_{ст} \times 10^x \quad (18)$$

где $i_{ст}$ – стандартное передаточное число редуктора;

принимая $i_{ст1}=25$, $i_{ст2}=31,5$;

x – целое число;

принимая $x=1$;

$$i_{\text{стр1}} = i_{\text{ст1}} \times 10^x = 2,5 \times 10^1 = 25;$$

$$i_{\text{стр2}} = i_{\text{ст2}} \times 10^x = 3,15 \times 10^1 = 31,5.$$

Стандартное передаточное отношение редуктора выбирается из ряда как ближайшее меньшее к расчетному:

$$i_{\text{стр}} \leq i_{\text{р}};$$

$$25 \leq 25,5;$$

$$31,5 \leq 33,3.$$

Двигатель с большей Θ принимается в качестве приводного.

Выбираем асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором серии АМТКФ132L6, технические данные представлены в таблице 6. [11, 12]

Таблица 6 – Технические данные асинхронного двигателя АМТКФ132L6

Тип двигателя	P_n , кВт	Частота вращения, об/мин	η_n , %	$\cos \varphi_n$	$J_{\text{дв}}$, кг·м ²
АМТКФ132L6	7,5	900	87	0,87	0,085
	$m_{\text{п}} = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_n}$	$m_{\text{м}} = \frac{M_{\text{мин}}}{M_n}$	$k_{I_{\text{дв}}} = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_n}$	$m_{\text{к}} = \frac{M_{\text{макс}}}{M_n}$	s_n , %
	2,2	-	4,2	2,2	10

2.2 Расчет параметров схемы замещения асинхронного двигателя

В справочной литературе отсутствуют параметры схемы замещения электродвигателя. Для определения параметров воспользуемся наиболее простой и удобной для инженерных расчетов асинхронного двигателя является Т-образная схема замещения, представленная на рисунке 8. [12]

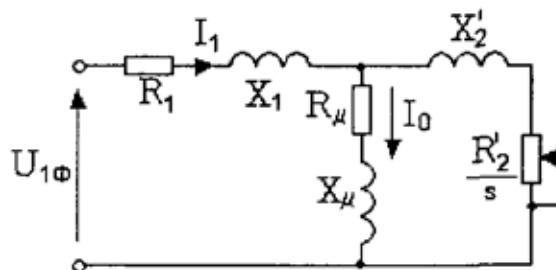


Рисунок 8 – Схема замещения асинхронного двигателя

Основные уравнения асинхронного двигателя, соответствующие принятой схеме замещения

$$\begin{aligned}\bar{U}_{1\phi} - \bar{E}_1 - jx_{1s} \bar{I}_1 - \bar{R}_1 \bar{I}_1 &= 0; \\ \bar{E}_1 - jx'_{2s} \bar{I}_2 + \frac{\bar{R}'_2}{s} \bar{I}_2 &= 0; \\ \bar{I}_1 + \bar{I}_2 - \bar{I}_0 &= 0,\end{aligned}\tag{19}$$

где $U_{1\phi}$ - фазное напряжение обмотки статора двигателя,

E_1 - ЭДС обмотки статора,

x_{1s} - индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора,

R_1 - активное сопротивление обмотки статора,

x'_{2s} - индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора,

R'_2 - активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора,

I_1 - ток обмотки статора,

I'_2 - ток обмотки ротора, приведенной к обмотке статора,

I_0 - ток холостого хода обмотки статора.

Исходными данными являются каталожные данные асинхронного двигателя АМТКФ132М6, представленные в таблице 6.

Ток холостого хода асинхронного двигателя можно найти по следующему выражению:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \frac{\dot{E} p_* I_{1H} (1 - s_H) \dot{U}^2}{\dot{E} (1 - p_* s_H) \dot{U}}}{1 - \frac{\dot{E} p_* (1 - s_H) \dot{U}^2}{\dot{E} (1 - p_* s_H) \dot{U}}}} = \sqrt{\frac{11,007^2 - \frac{\dot{E} 0,75 \times 5,013 \times (1 - 0,1) \dot{U}^2}{\dot{E} (1 - 0,75 \times 0,1)}}{1 - \frac{\dot{E} 0,75 \times (1 - 0,1) \dot{U}^2}{\dot{E} (1 - 0,75 \times 0,1)}}} = 1,552 A, \tag{20}$$

где s_H - номинальное скольжение;

$$s_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0} = \frac{104,72 - 94,248}{104,72} = 0,1, \tag{21}$$

где ω_0 - скорость холостого хода, рад/с;

$$\omega_0 = \frac{2 \times p \times n_{\max}}{60} = \frac{2 \times p \times 1000}{60} = 104,72 \text{ рад / с}; \quad (22)$$

ω_H - номинальная скорость вращения, рад/с;

$$\omega_{\text{НОМ}} = \frac{2 \times p \times n_{\text{НОМ}}}{60} = \frac{2 \times p \times 900}{60} = 94,248 \text{ рад / с}; \quad (23)$$

I_{1H} - номинальный ток статора двигателя;

$$I_{1H} = \frac{P_H}{3 \times U_H \times \cos j_H \times \eta_H} = \frac{7500}{3 \times 220 \times 0,87 \times 0,87} = 15,013 \text{ A}. \quad (24)$$

I_{11} - ток статора двигателя при частичной нагрузке;

$$I_{11} = \frac{p_{\text{ж}} \times P_H}{3 \times U_{1H} \times \cos f_{p_{\text{ж}}} \times \eta_{p_{\text{ж}}}} = \frac{0,75 \times 7500}{3 \times 220 \times 0,84 \times 0,87} = 11,007 \text{ A}. \quad (25)$$

Коэффициент загрузки двигателя

$$p_{\text{ж}} = \frac{P}{P_H} = 0,75 \quad (26)$$

Из формулы Клосса определяем соотношение, которое необходимо для расчета критического скольжения:

$$\begin{aligned} s_k &= s_H \times \frac{m_k + \sqrt{m_k^2 - [1 - 2 \times s_H \times b \times (m_k - 1)]}}{1 - 2 \times b \times (m_k - 1)} = \\ &= 0,1 \times \frac{2,2 + \sqrt{2,2^2 - [1 - 2 \times 0,1 \times (2,2 - 1)]}}{1 - 2 \times 0,1 \times (2,2 - 1)} = 0,542. \end{aligned} \quad (27)$$

значение коэффициента b находится в диапазоне 0,6 – 2,5, поэтому в первом приближении принимаем $b = 1$.

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \times k_i \times I_{1H}} = 1 + \frac{1,552}{2 \times 4,2 \times 15,013} = 1,012. \quad (28)$$

Активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя

$$R_2' = \frac{3 \times U_H^2 (1 - s_H)}{2 \times C_1^2 \times m_k \times P_H \times \frac{1}{s_k} + \frac{1}{0,542}} = \frac{3 \times 220^2 \times (1 - 0,1)}{2 \times 1,012^2 \times 2,2 \times 7500 \times \frac{1}{0,542} + \frac{1}{0,542}} = 1,358 \text{ Ом}. \quad (29)$$

Активное сопротивление статорной обмотки можно определить по следующему выражению

$$R_1 = C_1 \times R_2' \times b = 1,012 \times 1,358 \times 2 = 1,375 \text{ Ом.} \quad (30)$$

Определим параметр g который позволит найти индуктивное сопротивление короткого замыкания $X_{\text{кн}}$:

$$g = \sqrt{\frac{1}{s_k^2} - b^2} = \sqrt{\frac{1}{0,542^2} - 1^2} = 1,551. \quad (31)$$

тогда

$$X_{\text{кн}} = g \times C_1 \times R_2' = 1,551 \times 1,012 \times 1,358 = 2,132 \text{ Ом.} \quad (32)$$

Для того чтобы выделить из индуктивного сопротивления $X_{\text{кн}}$ сопротивления рассеяния фаз статора и ротора, необходимо воспользоваться соотношениями, которые справедливы для серийных асинхронных двигателей.

Индуктивное сопротивление роторной обмотки, приведенное к статорной, может быть рассчитано

$$X_{2s}' = \frac{0,58 \times X_{\text{кн}}}{C_1} = \frac{0,58 \times 2,132}{1,012} = 1,222 \text{ Ом.} \quad (33)$$

Индуктивное сопротивление статорной обмотки может быть определено по следующему выражению

$$X_{1s} = 0,42 \times X_{\text{кн}} = 0,42 \times 2,132 = 0,896 \text{ Ом.} \quad (34)$$

Согласно векторной диаграмме ЭДС ветви намагничивания E_1 , наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме, равна

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(U_{\text{н}} \cos j_{\text{н}} - R_1 I_{\text{н}})^2 + (U_{\text{н}} \sin j_{\text{н}} + X_{1\text{н}} I_{\text{н}})^2} = \\ &= \sqrt{(220 \times 0,87 - 1,375 \times 5,013)^2 + (220 \times 0,493 - 0,896 \times 5,013)^2} = 195,42 \text{ В.} \end{aligned} \quad (35)$$

тогда индуктивное сопротивление намагничивания

$$X_{\mu} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{195,42}{1,552} = 125,891 \text{ Ом.} \quad (36)$$

Исходя из расчетов индуктивных сопротивлений, рассчитаем индуктивность обмотки статора, ротора, намагничивания

$$L_1 = \frac{X_{1\sigma}}{2 \times \pi \times f_1} = \frac{0,896}{2 \times \pi \times 50} = 2,851 \text{ мГн;} \quad (37)$$

$$L_2 = \frac{X'_{2\sigma}}{2 \times p \times f_1} = \frac{1,222}{2 \times p \times 50} = 3,889 \text{ мГн}; \quad (38)$$

$$L_m = \frac{X_\mu}{2 \times p \times f_1} = \frac{125,891}{2 \times p \times 50} = 0,40072 \text{ Гн}. \quad (39)$$

Проверяем адекватность расчетных параметров двигателя.

При найденных параметрах рассчитываются значения номинального электромагнитного момента двигателя:

$$M_{\text{эм.н}}^* = \frac{3 \times U_{1\text{ф.н}}^2 \times R_2'}{w_0 \times s_n \times X_{\text{кн}}^2 + \frac{R_1'}{s_n} + \frac{R_2'^2}{0,1} + \frac{R_1' \times R_2' \times X_m^2}{0,1 \times 25,891}} =$$

$$= \frac{3 \times 220^2 \times 1,358}{104,72 \times 0,1 \times 2,132^2 + \frac{1,375}{0,1} + \frac{1,358^2}{0,1} + \frac{1,375 \times 1,358 \times 25,891^2}{0,1 \times 25,891}} = 82,509 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (40)$$

$$M_{\text{эм.н}}^{**} = \frac{3}{2} \times \psi_p \times \frac{L_m}{(L_m + L_{2\sigma})} \times Y_{2\text{н}} \times \sqrt{I_{1\text{н}}^2 - I_0^2} =$$

$$= \frac{3}{2} \times 3 \times \frac{0,40072}{(0,40072 + 3,889 \times 10^{-3})} \times 0,88 \times \sqrt{15,013^2 - 1,552^2} = 82,797 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (41)$$

где ψ_n – номинальное значение потокосцепления, Вб

$$Y_{2\text{н}} = \sqrt{2} \times I_0 \times L_m = \sqrt{2} \times 1,552 \times 0,40072 = 0,88 \text{ Вб} \quad (42)$$

Проверяем выполнения условий:

$$M_{\text{дв.н}} < M_{\text{эм.н}}^* \leq 1,1 \times M_{\text{дв.н}};$$

$$M_{\text{эм.н}}^{**} \approx M_{\text{эм.н}}^*$$

$$79,577 \text{ Н} \cdot \text{м} < 82,509 \text{ Н} \cdot \text{м} \leq 87,535 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$82,509 \text{ Н} \cdot \text{м} \approx 82,797 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

В результате расчета определим значение момента от сил трения двигателя

$$DM_{\text{с. дв}} = M_{\text{эм.н}} - M_{\text{дв.н}} = 82,509 - 79,577 = 2,932 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (43)$$

2.3 Выбор преобразователя частоты

Очень важно сделать правильный выбор преобразователя. От него будет зависеть эффективность и ресурс работы преобразователя частоты и

всего электропривода в целом. Так если мощность преобразователя будет слишком завышена, он не сможет в должной мере обеспечить защиту двигателя. С другой стороны, если мощность преобразователя мала, он не сможет обеспечить высокودинамичный режим работы и из-за перегрузок может выйти из строя.

Правильная эксплуатация так же сильно влияет на срок службы преобразователя. При выборе преобразователя частоты надо руководствоваться не только мощностью подключаемого двигателя, а также диапазоном рабочих скоростей двигателя, диапазоном рабочих моментов вращения, характером нагрузки и циклограммой работы.

Рассматривая особенности построения многодвигательных приводов, связанных общим механическим валом, и рекомендации по реализации и настройке таких систем, управлять такими системами позволяют преобразователи частоты Schneider Electric Altivar 71.

Сегодня многодвигательные приводы промышленных установок все чаще выполняются как регулируемые электроприводы переменного тока на базе асинхронного короткозамкнутого двигателя, питаемого от преобразователя частоты.

Силовая часть многодвигательных электроприводов может быть построена как по схеме с общим ПЧ, так и с индивидуальными преобразователями, обеспечивающими более гибкое управление промышленными установками. В обоих случаях отличительной особенностью таких установок является общая нагрузка, и проблема обеспечения ее равномерного распределения между двигателями является одной из важнейших для многодвигательных электроприводов.

Наиболее точное выравнивание нагрузки обеспечивается в многодвигательных системах с индивидуальными взаимосвязанными электроприводами, выполненными по схеме «Ведущий-ведомый».

В преобразователе частоты Altivar 71 имеется прикладная макроконфигурация «Ведущий-ведомый», значительно облегчающая настройку и ввод в эксплуатацию многодвигательных приводов.

Серия преобразователей частоты Altivar 71 отвечает самым строгим требованиям применений, благодаря использованию разнообразных законов управления двигателем и многочисленным функциональным возможностям. Она адаптирована для решения наиболее сложных задач электропривода:

- момент и повышенная точность при работе на очень низкой скорости и улучшенные динамические характеристики с алгоритмами векторного управления потоком в разомкнутой или замкнутой системе привода;
- расширенный диапазон выходной частоты для высокоскоростных двигателей; параллельное включение двигателей и специальные приводы с использованием скалярного закона управления; точность поддержания скорости и энергосбережение для разомкнутого привода с синхронным двигателем;
- плавное, безударное управление несбалансированными механизмами с помощью системы адаптации мощности (EnergyAdaptationSystem - ENA).

С расширением гаммы сетевого питания до ~690 В многофункциональность преобразователя Altivar 71 увеличивает производительность и гибкость использования машин для подъемно-транспортного оборудования:

- Управление тормозом, адаптированное для приводов перемещения, подъема и поворота.
 - Весоизмерение.
 - Подъем с повышенной скоростью.
 - Контроль состояния тормоза.
 - Управление воздействием концевых выключателей окончания хода.
- Выбор слабины тросов.

Технические параметры преобразователя частоты Schneider Electric Altivar 71 представлены в таблице 7. [13]

Таблица 7 – Технические параметры преобразователя частоты

Марка			Schneider Electric Altivar 71
Электропривод	Выходная частота		1 - 1600 Гц
	Закон управления		Векторное управление потоком в разомкнутой и замкнутой системах, закон “напряжение/частота” (2 или 5 точек), система адаптации мощности
	Переходный момент		220 % номинального момента двигателя в течение 2 с 170 % в течение 60 с
Функции	Количество функций		> 150
	Количество предварительно заданных скоростей		16
	Количество входов-выходов	Аналоговые входы	2-4
		Дискретные входы	6-29
		Аналоговые выходы	1-3
		Дискретные выходы	0-8
		Релейные выходы	2-4
Коммуникационная связь	Встроенная		Modbus и CANopen
Карты (дополнительные)			Интерфейсные карты для датчиков абсолютного и относительного отсчета, резольвера, карты расширения входов-выходов Карта программируемого контроллера
Полная мощность			17,8 кВА
Максимальный переходный ток			26,4А
Максимальный ток в установившемся режиме			17,6 А
Масса			7 кг
Нормы и сертификаты			МЭК/EN 61800-5-1, МЭК/EN 61800-3 (окружающая среда 1 и 2, C1 - C3), EN 55011, МЭК/EN 61000-4-2/4-3/4-4/4-5/4-6/4-11 e, UL, CSA, DNV, C-Tick, NOM 117, ГОСТ

2.4 Расчет естественных характеристик электропривода

Расчет естественных характеристик проводится с целью оценки степени совпадения параметров основных характерных точек расчетных естественных характеристик электродвигателя с параметрами двигателя

определенными по справочным техническим данным выбранного электродвигателя. [12, 14]

При векторном управлении рассчитываются и строятся только естественные механическую и электромеханическую характеристики электродвигателя при номинальном значении напряжения $U_{1н}$ и частоты $f_{1н}$.

Естественная механическая характеристика $M_{эм}(s)$ электродвигателя для частоты $f_{1н}=50$ Гц рассчитывается по выражению:

$$M_{эм}(s) = \frac{3 \times U_{1н}^2 \times R_2'}{\omega_0 \times \frac{e}{e} X_{кн}^2 + \frac{R_1}{s} + \frac{R_2'}{s} + \frac{R_1 \times R_2'}{s \times X_{\mu}^2}} \quad (44)$$

где $M_{эм}$ – электромагнитный момент двигателя, Нм.

По результатам расчета строится механическая характеристика $\omega=f(M)$ при $f_{1н}=50$ Гц, где значения угловой скорости вращения двигателя находятся по выражению.

Естественная механическая характеристика двигателя приведена на рисунке 9.

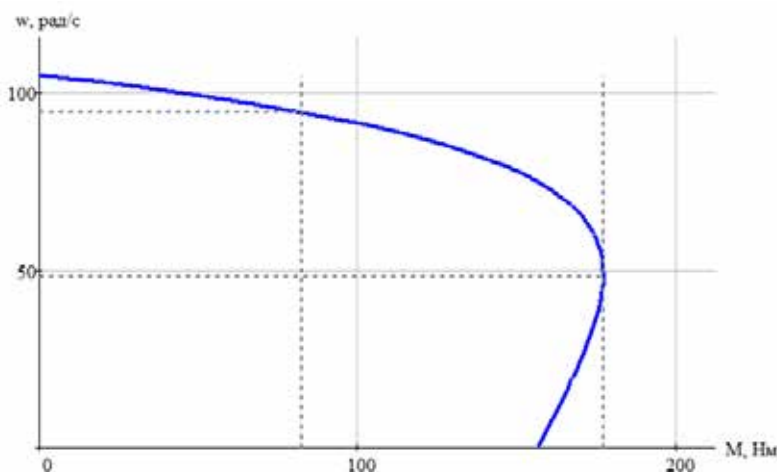


Рисунок 9 – Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя АМТКФ132L6

Естественная электромеханическая характеристика $I_1(s)$ электродвигателя рассчитывается для частоты $f_{1н}=50$ Гц по выражению:

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(s) + 2I_0 I_2'(s) \sin j_2(s)} \quad (45)$$

где $I_1 = I_{1H}$ – действующее значение фазного тока двигателя, А;

$$I_2'(s) = \frac{U_{1H}}{\pm \sqrt{X_{KH}^2 + \frac{R_1'}{s} + \frac{R_2'}{s} + \frac{X_{KH}^2}{s} + \frac{R_1' R_2'}{s} + \frac{X_{KH}^2}{s} + \frac{R_1' R_2'}{s}}} \quad (46)$$

I_2' – приведенный к обмотке статора ток ротора, А;

$$I_0 = \frac{U_{1H}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_{\mu})^2}} \quad (47)$$

I_0 – действующее значение тока холостого хода, А;

$$\sin j_2(s) = \frac{X_{KH}}{\sqrt{X_{KH}^2 + \frac{R_1'}{s} + \frac{R_2'}{s} + \frac{X_{KH}^2}{s} + \frac{R_1' R_2'}{s} + \frac{X_{KH}^2}{s} + \frac{R_1' R_2'}{s}}} \quad (48)$$

По результатам расчета строятся электромеханическая характеристика $\omega = f(I_1)$ и $\omega = f(I_2')$ (рисунок 10) при $f_{1H} = 50$ Гц.

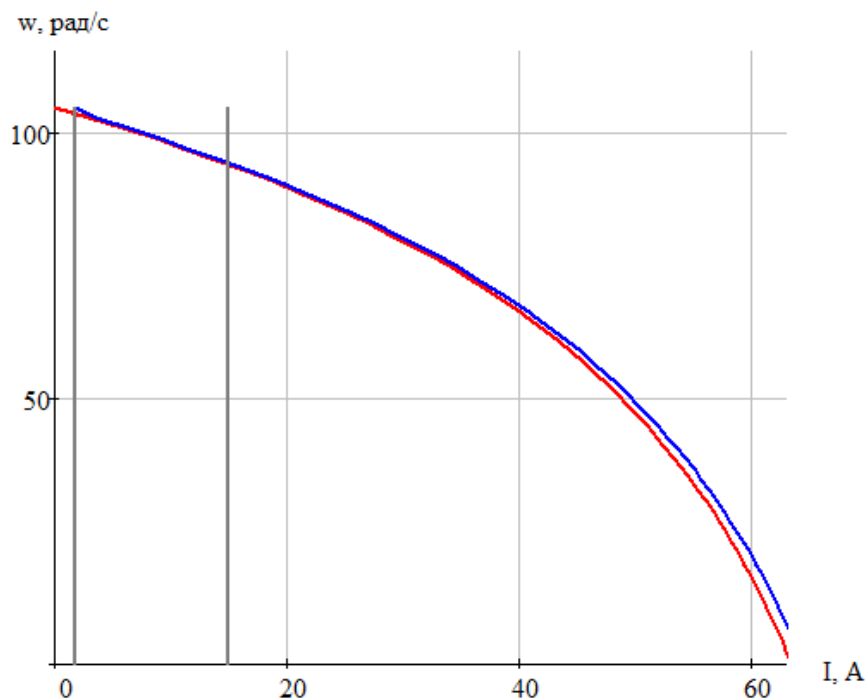


Рисунок 10 – Естественные электромеханические характеристики асинхронного двигателя АМТКФ132L6

2.5 Расчет статических характеристик двигателя и элементов силового канала и нагрузки электропривода при частотном векторном управлении

При векторном управлении следует рассчитать и построить только естественные механическую $\omega(M_{эм})$ и электромеханическую $\omega(I_1)$ характеристики электродвигателя при номинальном значении напряжения $U_{1н}$ и частоты $f_{1н}$ по приведенным выше выражениям. [14]

На полученную механическую характеристику $\omega(M)$ рисунка 9 наносятся граничные характеристики для длительного и кратковременного режимов работы:

$$M_{эп.макс} = 130,4 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{сприв.мин} = 10,9 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{сприв.макс} = 62,6 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{эмн} = 82,5 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_k = 177,1 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{дл.доп} = 74,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

На рисунке 11 в плоскости механических характеристик построены характеристики асинхронного двигателя и характеристики нагрузки.

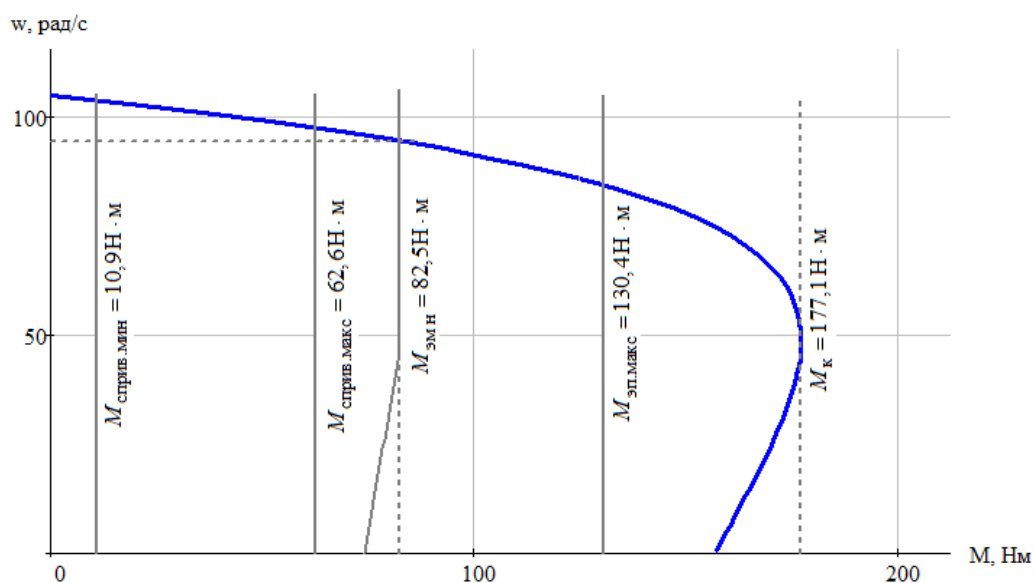


Рисунок 11 – Механические характеристики асинхронного двигателя и характеристики нагрузки

На рисунке 12 в плоскости электромеханических характеристик построены характеристики асинхронного двигателя и характеристики нагрузки.

$$\begin{aligned}
 I_0 &= 1,552 \text{ A}; \\
 I_{\text{смин}} &= 2,469 \text{ A}; \\
 I_{\text{смакс}} &= 10,251 \text{ A}; \\
 I_{\text{эпмакс}} &= 21,12 \text{ A}; \\
 I_{1\text{н}} &= 15,013 \text{ A}; \\
 I_{\text{дл.доп}} &= 13,512 \text{ A}; \\
 I_{\text{ином}} &= 17,6 \text{ A}; \\
 I_{\text{имакс}} &= 26,4 \text{ A}.
 \end{aligned}$$

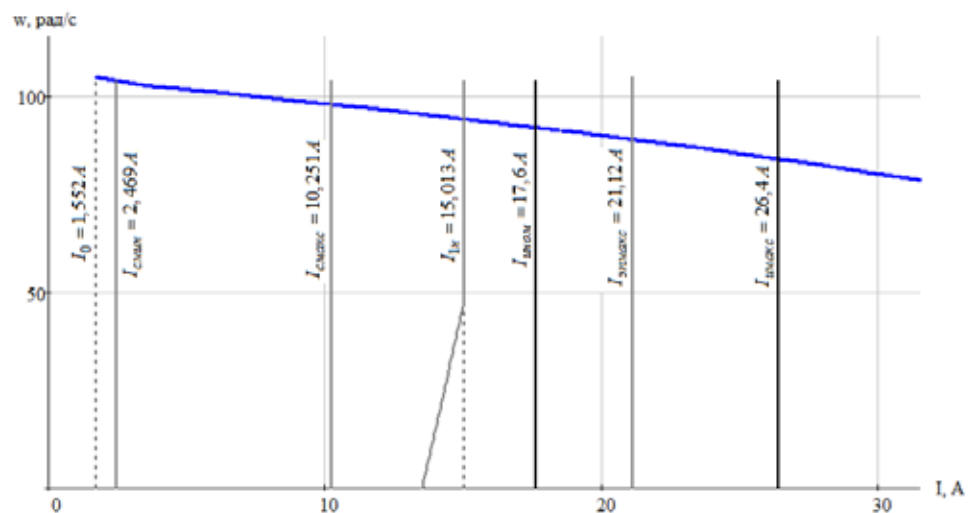


Рисунок 12 – Электромеханические характеристики асинхронного двигателя и характеристики нагрузки

Проверка правильности выбора двигателя

По результатам построения механических характеристик электропривода $\omega(M)$ и нагрузки $M(\omega)$ (рисунок 11) проверяется правильность выбора двигателя по моменту. Во всем диапазоне должны выполняться условия

$$\begin{aligned}
 M_{\text{эм.длит.доп}} &\geq M_{\text{с макс}}; \\
 77,2 \text{ Н} \cdot \text{м} &\geq 62,6 \text{ Н} \cdot \text{м}
 \end{aligned}$$

Следовательно, двигатель по моменту выбран правильно.

По результатам построения электромеханических характеристик электропривода $\omega(I_1)$ (рисунок 12) проверяется правильность выбора двигателя по току

$$I_{\text{дв.длит.доп}}^3 I_{\text{с макс}} ;$$

$$13,5 \text{ A} > 10,2 \text{ A}.$$

Следовательно, двигатель по току выбран правильно.

Проверка правильности выбора преобразователя

По результатам построения электромеханических характеристик электропривода $\omega(I_1)$ (рисунок 12) проверяется правильность выбора преобразователя по току:

– условие

$$I_{\text{с макс}}(\omega) \leq 0,8 \times I_{\text{и.н}} ;$$

$$10,2 \text{ A} \leq 0,8 \times 17,6 = 14,8 \text{ A}.$$

– условие

$$I_{\text{эп.макс}}(\omega) \leq I_{\text{и.макс}} ;$$

$$21,12 \text{ A} \leq 26,4 \text{ A}.$$

Следовательно, преобразователь выбран правильно.

2.6 Параметры, структурные схемы и модели системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель

Параметры звеньев структурной схемы двигателя

Эквивалентные индуктивности обмоток:

– статора

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_m = 2,851 \times 10^{-3} + 0,40072 = 0,40357 \text{ Гн.} \quad (49)$$

– ротора, приведенная к цепи статора,

$$L_2' = L_{2\sigma}' + L_m = 3,889 \times 10^{-3} + 0,40072 = 0,40461 \text{ Гн.} \quad (50)$$

Коэффициент рассеяния магнитного поля

$$s = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \times L_2'} = 1 - \frac{0,40072^2}{0,40357 \times 0,40461} = 0,017. \quad (51)$$

Эквивалентное активное сопротивление цепи статора (без учета сопротивления соединительных проводов)

$$R_{1\phi} = R_1 + R_2 \times \frac{L_m^2}{L_2^2} = 1,375 + 1,358 \times \frac{0,40072^2}{0,40461^2} = 2,707 \text{ Ом.} \quad (52)$$

Электромагнитные постоянные времени цепи статора и ротора:

$$T_{1\phi} = \frac{s \times L_1}{R_{1\phi}} = \frac{0,017 \times 0,40357}{2,707} = 2,476 \times 10^{-3} \text{ с;} \quad (53)$$

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2} = \frac{0,40461}{1,358} = 0,29794 \text{ с.} \quad (54)$$

Параметры преобразователя

В простейшем случае без учета ШИМ инвертор представляет собой линейный усилитель с чистым запаздыванием на величину периода широтно-импульсной модуляции $T_{\text{шим}}$

$$T_{\text{и}} = T_{\text{шим}} = \frac{1}{f_{\text{шим}}} = \frac{1}{10000} = 0,0001 \text{ с.} \quad (55)$$

где $f_{\text{шим}}$ – несущая частота инвертора (частота ШИМ);

принимая $f_{\text{шим}} = 10000 \text{ Гц}$.

Максимальные значения действующего и амплитудного фазного напряжения двигателя принимаются, соответственно, равными:

$$U_{\text{т}} = \sqrt{2} \times U_{\text{1фн}} = \sqrt{2} \times 220 = 311,1 \text{ В.} \quad (56)$$

С учетом ШИМ напряжения инвертора и при соединении обмоток статора двигателя в звезду параметры преобразователя выбираются в соответствии с приведенными ниже выражениями.

Линейное напряжение источника питания преобразователя

$$U_{\text{с}} = \frac{U_{\text{д}}}{1,35} = \frac{567,25}{1,35} = 420,185 \text{ В.} \quad (57)$$

где $U_{\text{с}}$ – напряжение звена постоянного тока преобразователя;

принимая исходя из условия согласования напряжения преобразователя и двигателя.

$$U_{\text{д}} \approx \sqrt{2} \times \sqrt{3} \times U_{\text{1фн}} = \sqrt{2} \times \sqrt{3} \times 220 = 538,88 \text{ В.} \quad (58)$$

Коэффициент усиления инвертора

$$k_{\text{и}} = \frac{U_{\text{д}}}{\sqrt{3}} = \frac{538,88}{\sqrt{3}} = 311,127. \quad (59)$$

Двухдвигательный электропривод механизма передвижения козлового крана будет включать в себя два асинхронных двигателя АМТКФ132М6 мощность 7,5кВт (таблица 6) с индивидуальными преобразователями частоты Schneider Electric Altivar 71 (таблица 7).

Рассчитанные параметры преобразователя частоты, асинхронного двигателя, а также механические и электромеханические характеристики являются основой для дальнейшего изучения двухдвигательного электропривода.

3 Оптимизация контуров регулирования

Характерной особенностью частотно-регулируемых электроприводов переменного тока является относительно большая инерционность в цепи обратной связи контуров регулирования тока, потокосцепления и скорости. По этой причине для их оптимизации не могут быть применена классическая теория оптимизации систем подчиненного регулирования, изложенная в работах Кесслера. Далее будут использованы методы оптимизации контуров регулирования с инерционной обратной связью, изложенные в учебном пособии. [1, 14, 15]

3.1 Оптимизация контура тока с ПИ-регулятором

Структурная схема контура тока приведена на рисунок 13. Контуров токов I_{ld} и I_{lq} реализованы по одной схеме и имеют одинаковые параметры

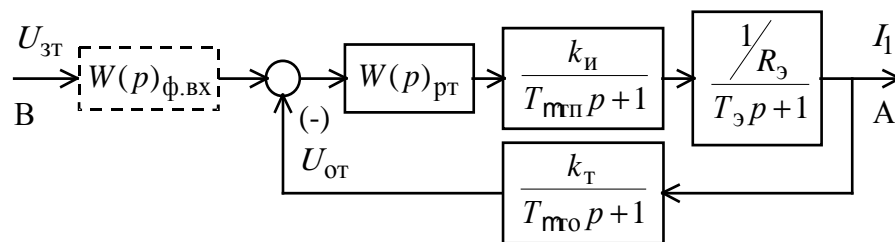


Рисунок 13 - Структурная схема контура тока

Оптимизируем данный контур по модулю

$$W_{\text{разл}} = W_{\text{рт}} \times \frac{k_{\text{тп}}}{T_{\text{тп}} \times p + 1} \times \frac{\frac{1}{R_3}}{T_{\text{лэ}} \times p + 1} \times \frac{k_{\text{дт}}}{T_{\text{дт}} \times p + 1}. \quad (60)$$

Постоянные времени $T_{\text{тп}}$ и $T_{\text{дт}}$ обычно гораздо меньше, чем $T_{\text{э}}$, поэтому относим их к не компенсируемому малому постоянному времени. В соответствии с этим появляется возможность понизить порядок системы:

$$W_{\text{разл}} \gg W_{\text{рт}} \times \frac{k_{\text{тп}} \times k_{\text{дт}}}{T_{\text{эл}} \times p + 1} \times \frac{\frac{1}{R_3}}{T_{\text{лэ}} \times p + 1}, \quad (61)$$

где $T_{\text{эл}}$ - эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура тока, с.

Для настройки на оптимум по модулю необходим ПИ-регулятор

$$W_{\text{рт}} = \frac{k_{\text{рт}} \times (T_{\text{рт}} \times p + 1)}{T_{\text{рт}} \times p}, \quad (62)$$

где $T_{\text{рт}}$ – постоянная времени регулятора тока,

принимая $T_{\text{рт}} = T_{13} = 0,2476$ с;

$k_{\text{рт}}$ – коэффициент регулятора тока;

$$k_{\text{рт}} = \frac{T_{13} \times R_3}{2 \times T_{\text{пл}} \times k_{\text{тп}} \times k_{\text{дт}}}. \quad (63)$$

В результате передаточная функция разомкнутого контура тока соответствует настройке на оптимум по модулю:

$$W_{\text{разл}} = \frac{1}{2 \times T_{\text{пл}} \times p \times (T_{\text{пл}} \times p + 1)}. \quad (64)$$

Передаточная функция замкнутого контура тока:

$$W_I = \frac{W_{\text{разл}}}{1 + W_{\text{разл}}} \times \frac{T_{\text{дт}} \times p + 1}{k_{\text{дт}}} = \frac{1}{2 \times T_{\text{пл}} \times p \times (T_{\text{пл}} \times p + 1) + 1} \times \frac{T_{\text{дт}} \times p + 1}{k_{\text{дт}}}. \quad (65)$$

Пренебрегая в знаменателе членом второго порядка малости, а в числителе постоянная времени $T_{\text{дт}} \approx 0$, передаточная функция контура тока

$$W_I \approx \frac{1}{2 \times T_{\text{пл}} \times p + 1} \times \frac{1}{k_{\text{дт}}}. \quad (66)$$

3.1.1 Параметры настройки контура тока с ПИ-регулятором

Согласно рекомендациям по выбору параметров при настройке контуров тока [14, 15] принимаем следующие значения:

Коэффициент, учитывающий возможное перерегулирование тока

$$\sigma_{\text{т}} \approx 1,2.$$

Коэффициент датчика тока

$$k_{\text{дт}} = \frac{0,5 \times 2^{n_{\text{анл.дт}}}}{\sigma_{\text{т}} \times \sqrt{2} \times I_{\text{эл.макс}}} = \frac{0,5 \times 2^{10}}{1,2 \times \sqrt{2} \times 1,12} = 14,285.$$

Значение максимального задания на входе контура тока $N_{\text{зт.макс}}$

$$N_{\text{зт.макс}} = \frac{1}{\sigma_{\text{т}}} = \frac{1}{1,2} = 0,8333.$$

тогда

$$k_T = \frac{1}{\sigma_T \times \sqrt{2} \times I_{\text{н}}} = \frac{1}{1,2 \times \sqrt{2} \times 5,013} = 0,039,$$

$$k_{\text{ос.т}} = \frac{1}{k_T} = \frac{1}{0,039} = 0,07.$$

Интервалы квантования сигналов в цепи обратной связи контура тока

$$T_{\text{ос.т}} = T_{\text{пк.т}} = T_{\text{зу.и}} = T_{\text{шим}} = 1 \times 10^{-4} \text{ с}$$

Постоянная времени аналогового фильтра в цепи измерения тока

$$T_{\text{ф.от}} = 0$$

Коэффициент аппроксимации звена чистого запаздывания апериодическим звеном для электроприводов общепромышленного назначения

$$n_T = 3$$

Эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура тока

$$T_{\mu\text{л}} = \frac{T_{\text{ос.т}}}{n_T} + T_{\text{зу.и}} + T_{\text{ф.от}} = \frac{1 \times 10^{-4}}{3} + 1 \times 10^{-4} + 0 = 1,333 \times 10^{-4} \text{ с.}$$

Коэффициент типовой настройки контура тока

$$a_T = 2.$$

Коэффициент усиления регулятора тока

$$k_{\text{пр}} = \frac{T_{\text{лэ}} \times R_{\text{лэ}}}{k_{\text{и}} \times k_T \times a_T \times T_{\mu\text{л}}} = \frac{2,47601 \times 10^{-3} \times 2,707}{311,127 \times 0,039 \times 2 \times 1,333 \times 10^{-4}} = 2,058 \text{ о.е.}$$

Эквивалентная постоянная времени замкнутого контура тока

$$T_T = a_T \times T_{\mu\text{л}} = 2 \times 1,333 \times 10^{-4} = 2,666 \times 10^{-4} \text{ с.}$$

3.2 Оптимизация контура потокосцепления с ПИ-регулятором

Структурная схема контура потокосцепления с ПИ-регулятором приведена на рисунке 14.

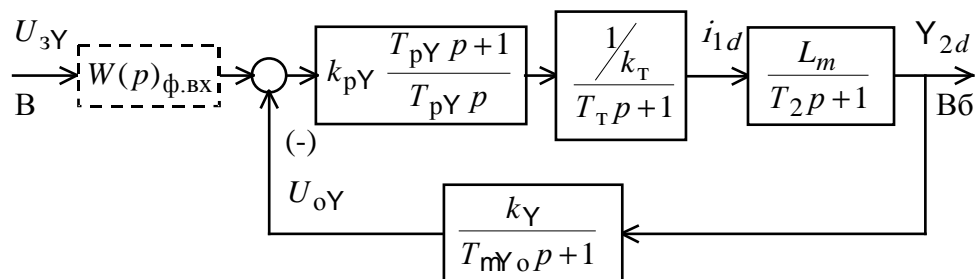


Рисунок 14 - Структурная схема контура потокосцепления с ПИ-регулятором

При оптимизации контура потокосцепления внутренний оптимизированный замкнутый контур тока представлен усеченной передаточной функцией 1-го порядка (выражение (66)).

Коэффициент обратной связи контура по потокосцеплению

$$k_Y = \frac{U_{3Y \text{ макс}}}{Y_{2H}} \quad (67)$$

Передаточная функция ПИ-регулятора потокосцепления

$$W_{pY} = k_{pY} \times \frac{T_{pY} \times p + 1}{T_{pY} \times p}. \quad (68)$$

Коэффициент усиления и постоянная времени регулятора потокосцепления определяются по выражениям

$$k_{pY} = \frac{T_2 \times k_T}{L_m \times k_Y} \times \frac{1}{a_Y \times T_{mY3}} \quad (69)$$

$$T_{pY} = T_2 \quad (70)$$

где T_{mY3} – эквивалентная малая постоянная контура потокосцепления, с.

Контур потокосцепления с ПИ-регулятором, настроенный таким образом, имеет следующие передаточные функции:

– разомкнутого контура

$$W_{Y \text{ раз}} = \frac{1}{a_Y T_T T_{mY0} T_{mY3} p^3 + a_Y T_{mY3}^2 p^2 + a_Y T_{mY3} p} \quad (71)$$

– замкнутого контура по управлению

$$W_{y \text{ зам}} = \frac{\frac{1}{k_Y} \times (T_{m\phi} p + 1)}{a_Y T_T T_{m\phi} T_{m\phi} p^3 + a_Y T_{m\phi}^2 p^2 + a_Y T_{m\phi} p + 1} \gg \frac{\frac{1}{k_Y} \times (T_{m\phi} p + 1)}{a_Y T_{m\phi}^2 p^2 + a_Y T_{m\phi} p + 1}. \quad (72)$$

Настройка контура потокосцепления с ПИ-регулятором близка к настройке на МО системы 2-го порядка.

3.2.1 Параметры настройки контура потокосцепления с ПИ-регулятором

Согласно рекомендациям по выбору параметров при настройке контуров потокосцепления [14, 15] принимаем следующие значения:

Коэффициент, учитывающий возможное перерегулирование тока

$$\sigma_Y \approx 1,2.$$

Коэффициент датчика потокосцепления

$$k_{дУ} = \frac{1}{\sigma_T \times \gamma_{2н}} = \frac{1}{1,2 \times 0,88} = 0,947.$$

Значение максимального задания на входе контура потокосцепления

$$N_{зУ \cdot \text{макс}} = \frac{1}{\sigma_Y} = \frac{1}{1,2} = 0,8333293$$

Коэффициент аппроксимации звена чистого запаздывания апериодическим звеном для электроприводов общепромышленного назначения

$$n_Y = 2$$

Эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура скорости

$$T_{m\phi} = 1,1 \times 10^{-3} \text{ с.}$$

Коэффициент типовой настройки контура тока

$$a_Y = 2$$

Постоянная времени регулятора

$$T_{pY} = T_2 = 0,29794 \text{ с.}$$

Коэффициент усиления регулятора тока

$$k_{\text{пр}} = \frac{T_2 \times k_T}{L_m \times k_{\text{дв}} \times a_y \times T_{\mu\psi}} \times \frac{1}{0,40072 \times 0,947} \times \frac{1}{2 \times 1,1 \times 10^{-3}} = 14,008 \text{ о.е.}$$

3.3 Оптимизация контура скорости с ПИ-регулятором

Структурная схема контура скорости с ПИ-регулятором приведена на рисунке 15.

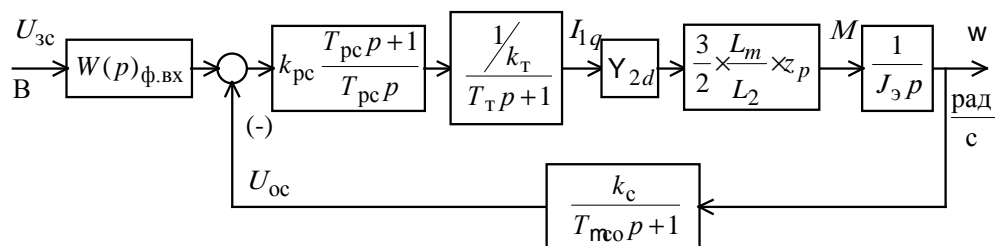


Рисунок 15 - Структурная схема контура скорости с ПИ-регулятором

При оптимизации контура потокосцепления внутренний оптимизированный замкнутый контур тока представлен усеченной передаточной функцией 1-го порядка, согласно выражению (66).

Коэффициент обратной связи контура по потокосцеплению

$$k_Y = \frac{U_{3Y \text{ макс}}}{Y_{2н}} \quad (73)$$

Передаточная функция ПИ-регулятора потокосцепления

$$W_{\text{pc}} = k_{\text{pc}} \times \frac{T_{\text{pc}}p + 1}{T_{\text{pc}} \times p}. \quad (74)$$

Коэффициент усиления и постоянная времени регулятора потокосцепления определяются по выражениям

$$k_{\text{pc}} = \frac{J_э \times k_T}{Y_{2н} \times k_{\text{дв}} \times k_c \times a_c \times T_{\text{мэ}}}, \quad (75)$$

$$T_{\text{pc}} = b_c \times a_c \times T_{\text{мэ}}. \quad (76)$$

где $T_{\mu\psi}$ – эквивалентная малая постоянная контура потокосцепления, с.

Контур потокосцепления с ПИ-регулятором, настроенный таким образом, имеет следующие передаточные функции:

– разомкнутого контура

$$W_{\text{сраз}} = \frac{b_c a_c T_{\text{мэ}} p + 1}{b_c a_c^2 T_{\text{т}} T_{\text{мо}} T_{\text{мэ}}^2 p^4 + b_c a_c^2 T_{\text{мэ}}^3 p^3 + b_c a_c^2 T_{\text{мэ}}^2 p^2}; \quad (77)$$

– замкнутого контура по управлению

$$W_{\text{сзам}} = \frac{1}{k_c} \cdot \frac{(b_c a_c T_{\text{мэ}} p + 1) \times (T_{\text{мо}} p + 1)}{b_c a_c^2 T_{\text{т}} T_{\text{мо}} T_{\text{мэ}}^2 p^4 + b_c a_c^2 T_{\text{мэ}}^3 p^3 + b_c a_c^2 T_{\text{мэ}}^2 p^2 + b_c a_c T_{\text{мэ}} p + 1} \gg \frac{1}{k_c} (b_c a_c T_{\text{мэ}} p + 1) \times (T_{\text{мо}} p + 1) \gg \frac{1}{b_c a_c^2 T_{\text{т}} T_{\text{мо}} T_{\text{мэ}}^2 p^4 + b_c a_c^2 T_{\text{мэ}}^3 p^3 + b_c a_c^2 T_{\text{мэ}}^2 p^2 + b_c a_c T_{\text{мэ}} p + 1}. \quad (78)$$

Настройка контура потокосцепления с ПИ-регулятором близка к настройке на МО системы 2-го порядка.

3.3.1 Параметры настройки контура потокосцепления с ПИ-регулятором

Согласно рекомендациям по выбору параметров при настройке контуров скорости [14, 15] принимаем следующие значения:

Коэффициент, учитывающий возможное перерегулирование скорости

$$\sigma_w \approx 1,2.$$

Коэффициент датчика скорости

$$k_{\omega} = \frac{1}{\sigma_{\omega} \times \omega_H} = \frac{1}{1,2 \times 94,248} = 8,842 \times 10^{-3}.$$

Значение максимального задания на входе контура скорости

$$N_{\text{зш.макс}} = \frac{1}{\sigma_w} = \frac{1}{1,2} = 0,8333293.$$

Коэффициент аппроксимации звена чистого запаздывания апериодическим звеном для электроприводов общепромышленного назначения

$$n_w = 2.$$

Эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура скорости

$$T_{mv} = 1,9 \times 10^{-3} \text{ с.}$$

Коэффициент типовой настройки контура скорости

$$a_w = 2.$$

Постоянная времени регулятора скорости

$$T_{pw} = T_{mv} \times 4 = 1,9 \times 10^{-3} \times 4 = 7,6 \times 10^{-3} \text{ с.}$$

Коэффициент усиления регулятора тока

$$k_{pc} = \frac{J_{\gamma} \times k_{\tau}}{Y_{2H} \times k_{дв} \times k_c \times a_c \times T_{мэ}} = \frac{0,264 \times 0,039}{0,88 \times 4,457 \times 8,842 \times 10^{-3} \times 2 \times 1,9 \times 10^{-3}} = 78,485.$$

При настройке системы управления электропривода используется один из универсальных регуляторов - ПИ-регулятор. Для каждого из контуров рассчитаны коэффициенты и постоянные времени регуляторов.

4 Разработка имитационной модели электропривода

4.1 Математическая модель асинхронного двигателя

Для исследования в среде Matlab воспользуемся двухфазной моделью реальной трёхфазной машины в системе координат d, q.

Если во вращающейся синхронно с полем статора ($\omega_{\text{кв}} = \omega_{\text{эл}}$) системе координат x, y ось x совместить с вектором потокосцепления ротора Ψ_2 , то с учетом соотношения, характерных для СК d, q,

$$\begin{aligned} Y_{2d} &= \left| \vec{Y}_2 \right|; \\ Y_{2q} &= 0, \end{aligned} \quad (79)$$

получим

$$\begin{aligned} \left| \vec{Y}_2 \right| &= Y_{2x} = Y_{2d}, \\ Y_{2y} &= Y_{2q} = 0 \end{aligned} \quad (80)$$

и тогда система уравнений будет иметь вид

$$\begin{aligned} \frac{dI_{1d}}{dt} &= \frac{1}{s L_1} U_{1d} - \frac{R_2}{s L_1} I_{1d} + \frac{R_2' L_m}{s L_1 L_2} Y_{2d} + w_{\text{кв}} I_{1q}; \\ \frac{dI_{1q}}{dt} &= \frac{1}{s L_1} U_{1q} - \frac{R_2}{s L_1} I_{1q} - w_{\text{кв}} I_{1d} - \frac{L_m}{s L_1 L_2} z_p w Y_{2d}; \\ \frac{dY_{2d}}{dt} &= - \frac{R_2'}{L_2} Y_{2d} + \frac{R_2' L_m}{L_2} I_{1d}; \\ 0 &= \frac{R_2' L_m}{L_2} I_{1q} - (w_{\text{кв}} - z_p w) Y_{2d}; \\ M_{\text{эм}} &= \frac{3}{2} \times \frac{L_m}{L_2} z_p Y_{2d} I_{1q}; \\ \frac{dw}{dt} &= \frac{1}{J} (M_{\text{эм}} - M_c), \end{aligned} \quad (81)$$

где $U_{1d} = U_{1q} = U_1$ – постоянные по форме составляющие напряжения статора в ориентированной по вектору потокосцепления ротора \vec{Y}_2 , вращающейся синхронно с полем статора системе координат d, q;

I_{1d}, I_{1q} – составляющие тока статора в системе координат d, q, А;

$Y_{2d} = \left| \vec{Y}_2 \right|$ – потокосцепление ротора в системе координат d, q, Вб.

В операторной форме записи

$$\begin{aligned}
 \begin{cases}
 U_{1d} = R_s (T_s p + 1) I_{1d} - \frac{R'_2 L_m}{L_2^2} Y_{2d} - w_{\text{кв}} s L_1 I_{1q}; \\
 U_{1q} = R_s (T_s p + 1) I_{1q} + w_{\text{кв}} s L_1 I_{1d} + \frac{L_m}{L_2} z_p w Y_{2d}; \\
 0 = (T_2 p + 1) Y_{2d} - L_m I_{1d}; \\
 w_{\text{кв}} = z_p w + \frac{L_m R'_2}{L_2} \frac{I_{1q}}{Y_{2d}}; \\
 M_{\text{эм}} = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} z_p Y_{2d} I_{1q}; \\
 w = \frac{1}{J p} (M_{\text{эм}} - M_c).
 \end{cases}
 \end{aligned} \tag{82}$$

Уравнениям (1.22) соответствует приведенная на рисунке 16 структурная схема асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, выполненная во вращающейся системе координат d, q ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора.

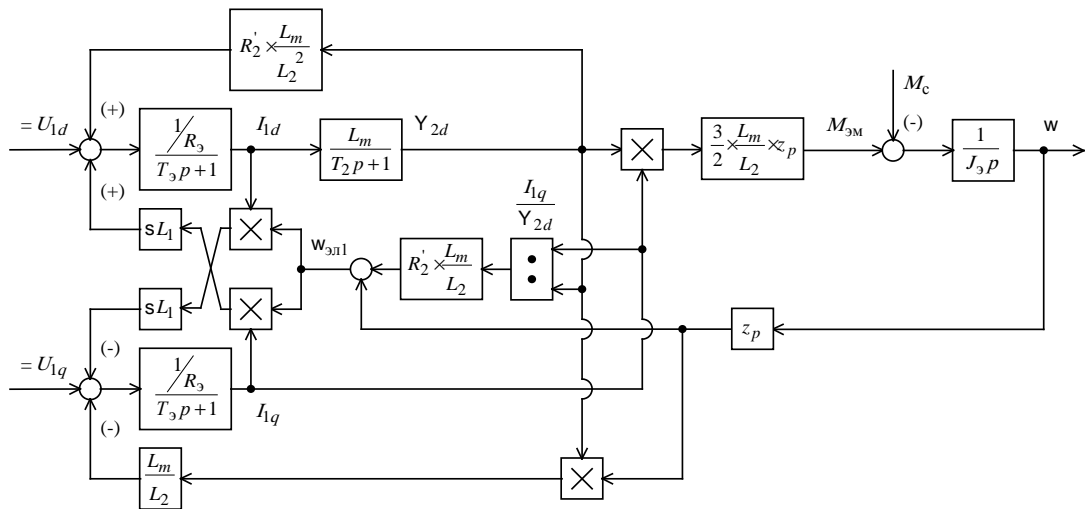


Рисунок 16 - Структурная схема асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором во вращающейся системе координат d, q, ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора

Структурная схема рисунок 16 содержит внутренние обратные связи, в том числе нелинейные перекрестные. Природа этих связей вытекает из схемы замещения рисунок 17 и уравнений напряжения статора системы (82):

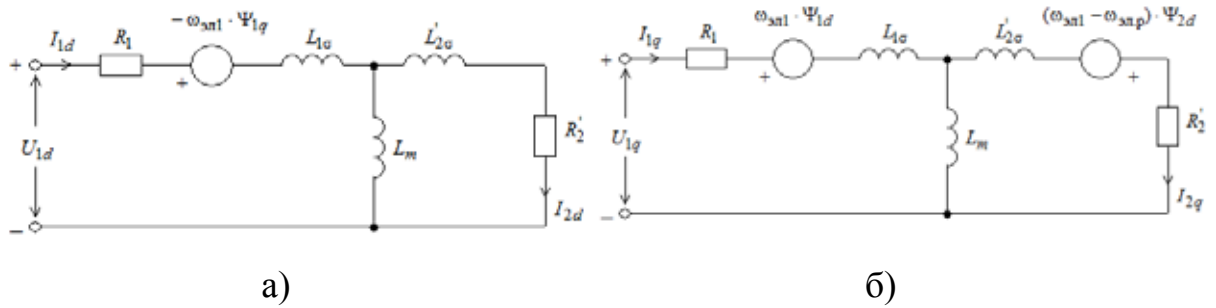


Рисунок 17 - Схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором во вращающейся со скоростью $\omega_{эл1}$ ориентированной по вектору потокосцепления ротора Ψ_2 роторной системе координат d, q:

а – по оси d;

б – по оси q

$$U_{1d} = R_s \times (T_s \times p + 1) \times I_{1d} - e_d; U_{1q} = R_s \times (T_s \times p + 1) \times I_{1q} + e_q, \quad (83)$$

где e_d, e_q - составляющие внутренней ЭДС двигателя, наводимые в статоре;

$$e_d = \frac{R_2' \times L_m}{L_2^2} \times Y_{2d} + \omega_{\text{к}} \times \mathcal{S} \times L_1 \times I_{1q},$$

$$e_q = \omega_{\text{к}} \times \mathcal{S} \times L_1 \times I_{1d} + \frac{L_m}{L_2} \times \mathcal{Z}_p \times \omega \times Y_{2d}. \quad (84)$$

$\frac{R_2' \times L_m}{L_2^2} \times Y_{2d}$ - падение напряжения в роторной цепи;

$$\frac{R_2' \times L_m}{L_2^2} \times Y_{2d} = \frac{R_2' \times L_m}{L_2^2} \times (L_2 \times I_{2d} + L_m \times I_{1d}) = R_2' \times \frac{\mathcal{A} L_m}{\mathcal{E} L_2} \times I_{2d} + \frac{L_m^2}{L_2^2} \times I_{1d} \div \emptyset \quad (85)$$

$\omega_{\text{к}} \times \mathcal{S} \times L_1 \times I_{1q}, \omega_{\text{к}} \times \mathcal{S} \times L_1 \times I_{1d}$ - составляющие ЭДС самоиндукции (падения напряжения на индуктивном сопротивлении статора);

$\frac{L_m}{L_2} \times \mathcal{Z}_p \times \omega \times Y_{2d}$ - ЭДС вращения, наводимая в статоре потокосцеплением ротора.

Данной системе уравнений соответствует модель в Matlab Simulink, представленная на рисунке 18.

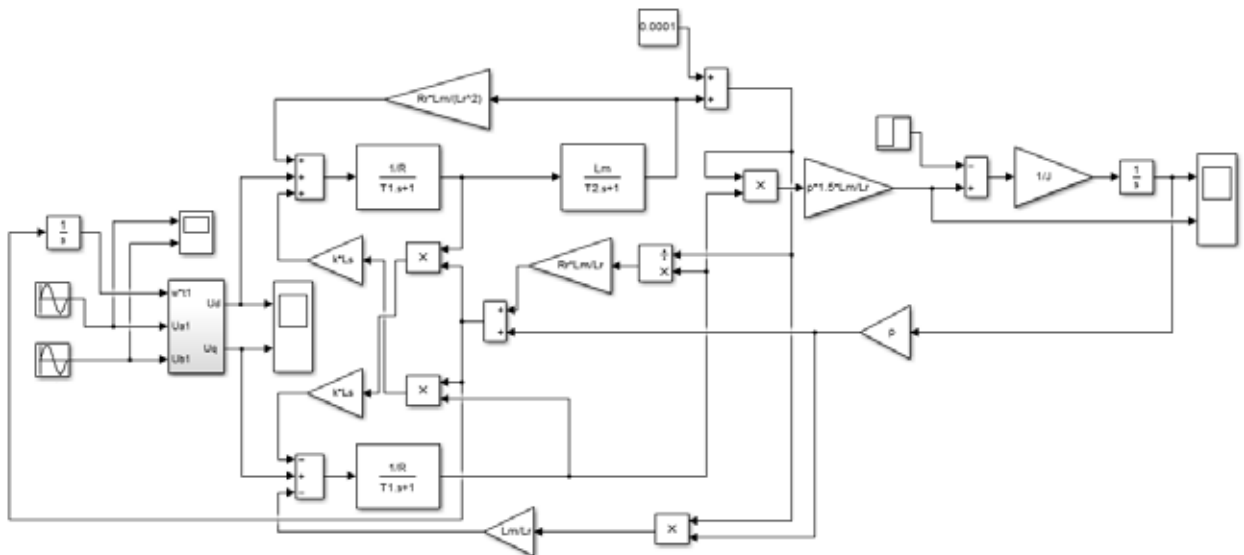


Рисунок 18 - Имитационная модель асинхронного двигателя с активной нагрузкой в Matlab Simulink

4.2 Механическая часть электропривода механизма передвижения козлового крана

Модель на рисунке 18 имеет активную нагрузку, так как в реальности нагрузка имеет реактивный характер, в модель необходимо дополнительно включить систему блоков имитирующую реактивную нагрузку. Для это используем блок S-Function Blder.

Компонент, реализующий реактивный момент сопротивления:

if (w[0]>0) M[0]=Minput[0];

if (w[0]<0) M[0]= - Minput [0];

if (w[0]==0) Mc[0]=0;

Алгоритм функционирования будет следующий:

- 1.Если скорость положительная, то момент сопротивления равен заданному.
- 2.Если скорость отрицательная, то момент сопротивления равен заданному с обратным знаком.
- 3.Если скорость равна «0», то момент сопротивления равен 0.

Отключение двигателя от сети достигается за счет срабатывания блока «Switch» в 0,5 с.

Для удобства электромеханический преобразователь и механическую часть объединим в отдельные системы, результат представлен на рисунке 19.

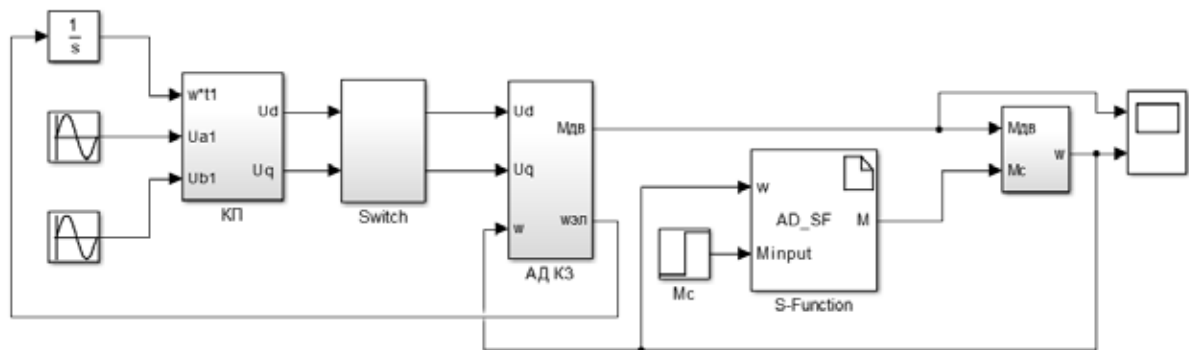


Рисунок 19 – Имитационная модель асинхронного двигателя с реактивной нагрузкой

Для проверки работоспособности имитационной модели реактивной нагрузки, произведем пуск двигателя на малой нагрузке $10\% \cdot M_n$ Н·м, увеличим нагрузку до номинальной 82,502 Н·м в момент времени 0,25 с. и отключим двигатель от сети в момент времени 0,5 с. Так как нагрузка реактивная двигатель должен затормозить выбегом. На рисунке 20 показаны полученные графики. Полученные графики соответствуют ожиданиям, следовательно, модель реактивной нагрузки работает правильно.

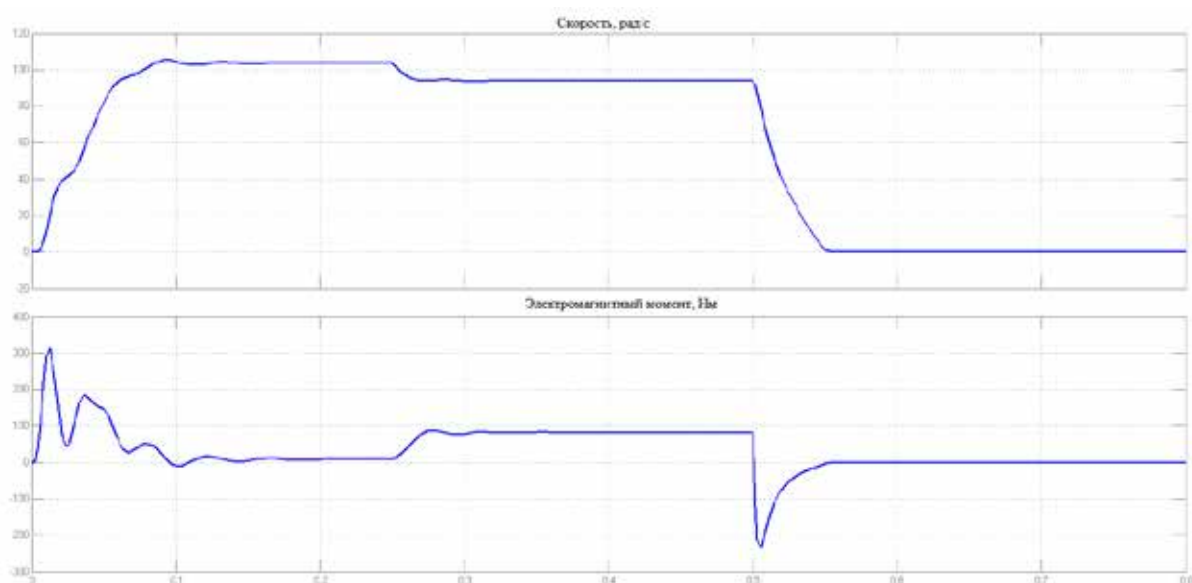


Рисунок 20 - Графики зависимостей $n = f(t)$ и $M = f(t)$

4.3 Проверка адекватности разработанной модели асинхронного двигателя

Для проверки адекватности разработанной математической модели на основе модулей библиотеки SimPowerSystem Simulink Matlab собираем имитационную модель асинхронного двигателя изображенную на рисунке 21.

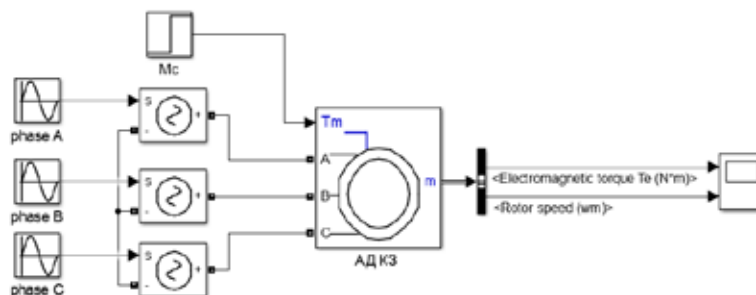


Рисунок 21 – Имитационная модель асинхронного двигателя на основе модулей библиотеки SimPowerSystem.

Динамические характеристики полученные с помощью этой модели представлены на рисунке 22. Характеристики полученные с помощью математической модели представлены на рисунке 23. Двигатель разгоняется без нагрузки, в момент времени 0,25 с. происходит подключение нагрузки $M_H=82,502$ Нм.

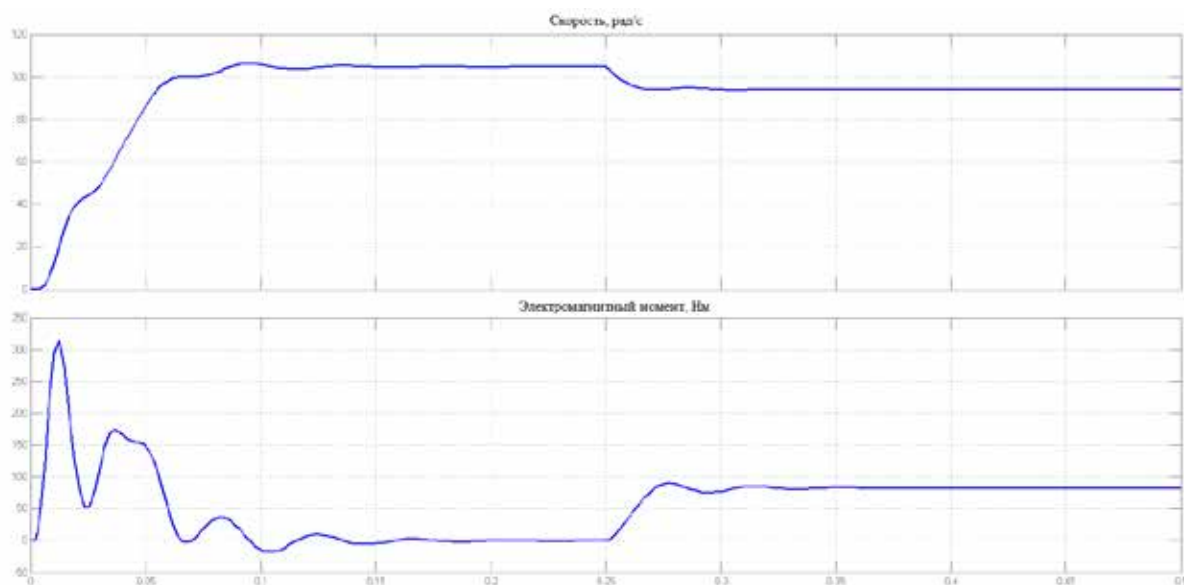


Рисунок 22 – Графики зависимостей $n = f(t)$ и $M = f(t)$ полученные с помощью библиотечной модели двигателя.

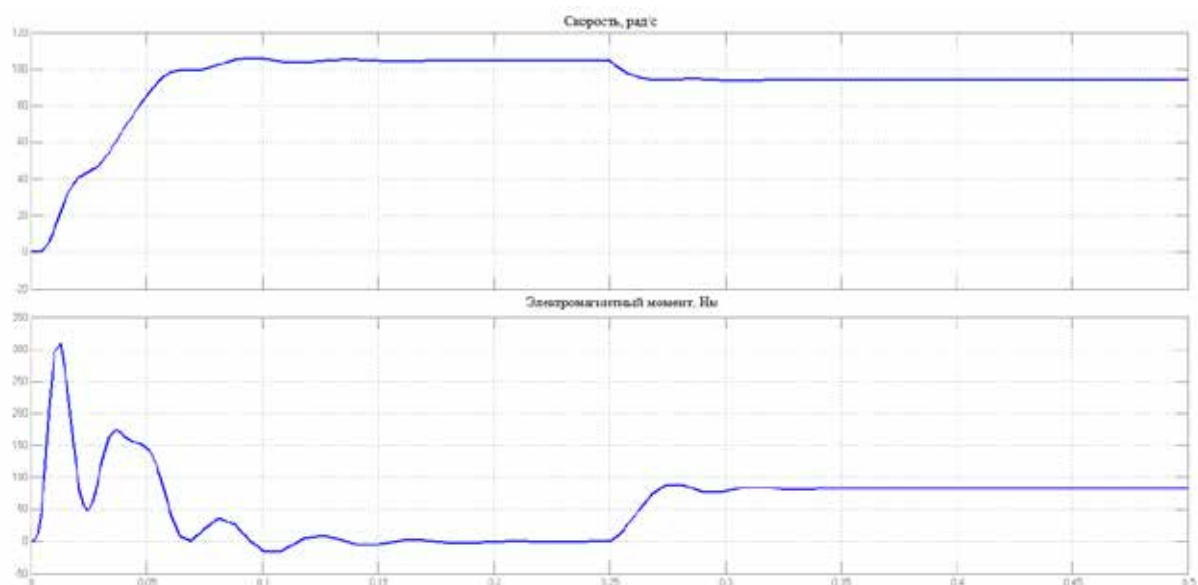


Рисунок 23 – Графики зависимостей $n = f(t)$ и $M = f(t)$, полученные с помощью математической модели двигателя в системе координат d, q

Анализ двух расчётов – с моделью SimPowerSystems и с разработанной по математическому описанию – показывает их полное сходжение, что позволяет утверждать о возможности использования разработанной модели в исследованиях электропривода переменного тока.

4.4 Исследование способов управления для электропривода системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель»

На основании режимов работы и выбора частотного управления асинхронными короткозамкнутыми электродвигателями механизмов передвижения, рассматривается выборка оптимальных способов их управления.

В частотно-регулируемом электроприводе существуют несколько общеизвестных способов управления: скалярный (U/f регулирование), векторный с обратной связью по скорости одного двигателя и с обратной связью по скорости каждого асинхронного двигателя.

При изготовлении двигателей неизбежны отклонения параметров обмоток, а при эксплуатации механизма передвижения один двигатель может быть нагружен больше чем другой, что приводит к различию

жесткости механических характеристик двигателей. Для имитации такого случая принудительно нагрузим дополнительно один из асинхронных двигателей (АД КЗ 2).

4.4.1 Скалярное управление

Модель двухдвигательного электропривода при скалярном управлении, состоящая из формирователя напряжения (U/f control), электромеханических преобразователей (АД КЗ 1 и АД КЗ 2) и механической части представлена на рисунке 24.

Динамические характеристики двухдвигательного электропривода при скалярном управлении приведены на рисунке 25.

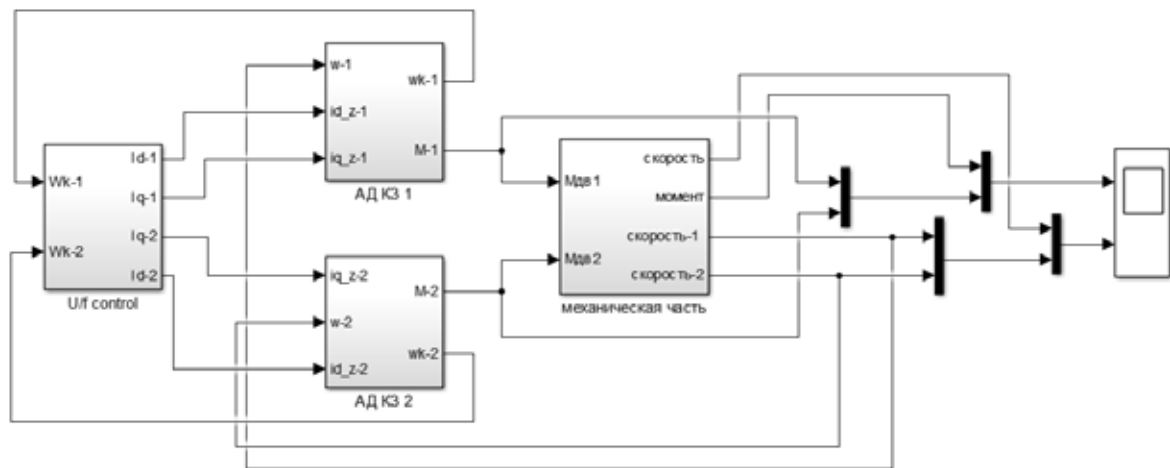


Рисунок 24 – Имитационная модель двухдвигательного электропривода при скалярном управлении

Определим относительную величину неравномерности синхронизации скоростей двигателей:

$$D_{c_{cy}} = \frac{Dw}{w_{cy}} \times 100\% = \frac{0,5}{18,3} \times 100\% = 2,73\%. \quad (86)$$

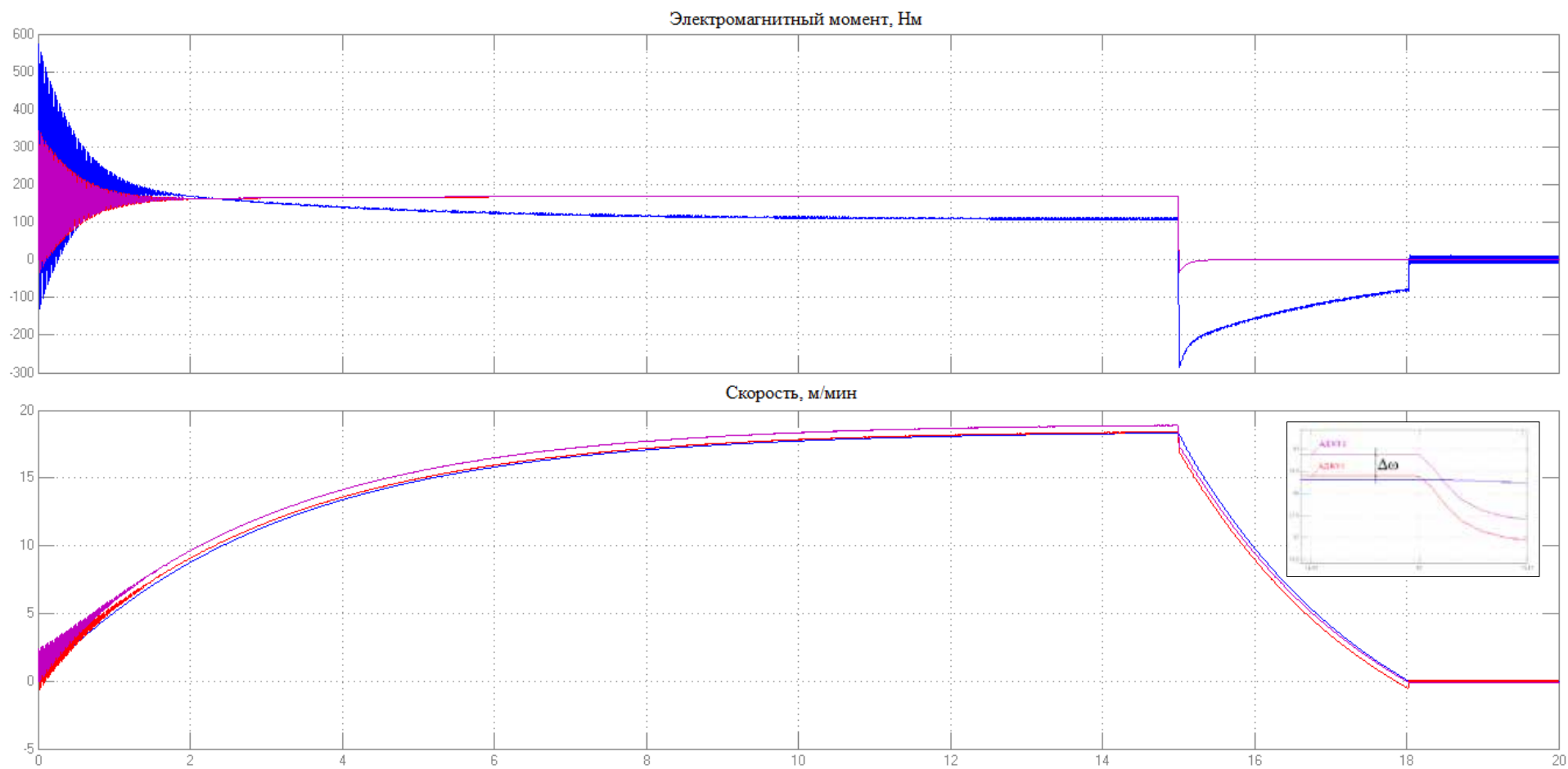


Рисунок 25 - Динамические характеристики $M = f(t)$ и $n = f(t)$ двухдвигательного электропривода при скалярном управлении

По полученному переходному процессу определим расстояния на которое одна опора опережает другую за 1 секунду.

Для этого найдем расстояние, которое проходит каждая опора за 1 секунду по формуле

$$S_i = \frac{v_i \times 1}{60}. \quad (87)$$

Поставляя численные значения в формулу (87) получим

$$S_1 = \frac{v_{\partial 61} \times 1}{60} = \frac{18,4 \times 1}{60} = 0,3067 \text{ м};$$
$$S_2 = \frac{v_{\partial 62} \times 1}{60} = \frac{18,9 \times 1}{60} = 0,3150 \text{ м};$$

Найдем разницу расстояния между опорами

$$S = S_1 - S_2 \quad (88)$$
$$S = 0,3067 - 0,3150 = 0,0083 \text{ м}.$$

При данном способе управления наблюдается постоянное рассогласование скоростей на всем участке работы, а также не соответствие требования к режиму работы (рисунок 6).

4.4.2 Векторное управление с обратной связью по скорости одного двигателя

Модель двухдвигательного электропривода при векторном управлении с обратной связью по скорости одного двигателя, состоящая из S-задатчика скорости, общего контура скорости, контуров тока и потокосцепления (для каждого двигателя), электромеханических преобразователей (АД КЗ 1 и АД КЗ 2) и механической части представлена на рисунке 26.

Динамические характеристики двухдвигательного электропривода при векторном управлении с обратной связью по скорости одного двигателя приведены на рисунке 27.

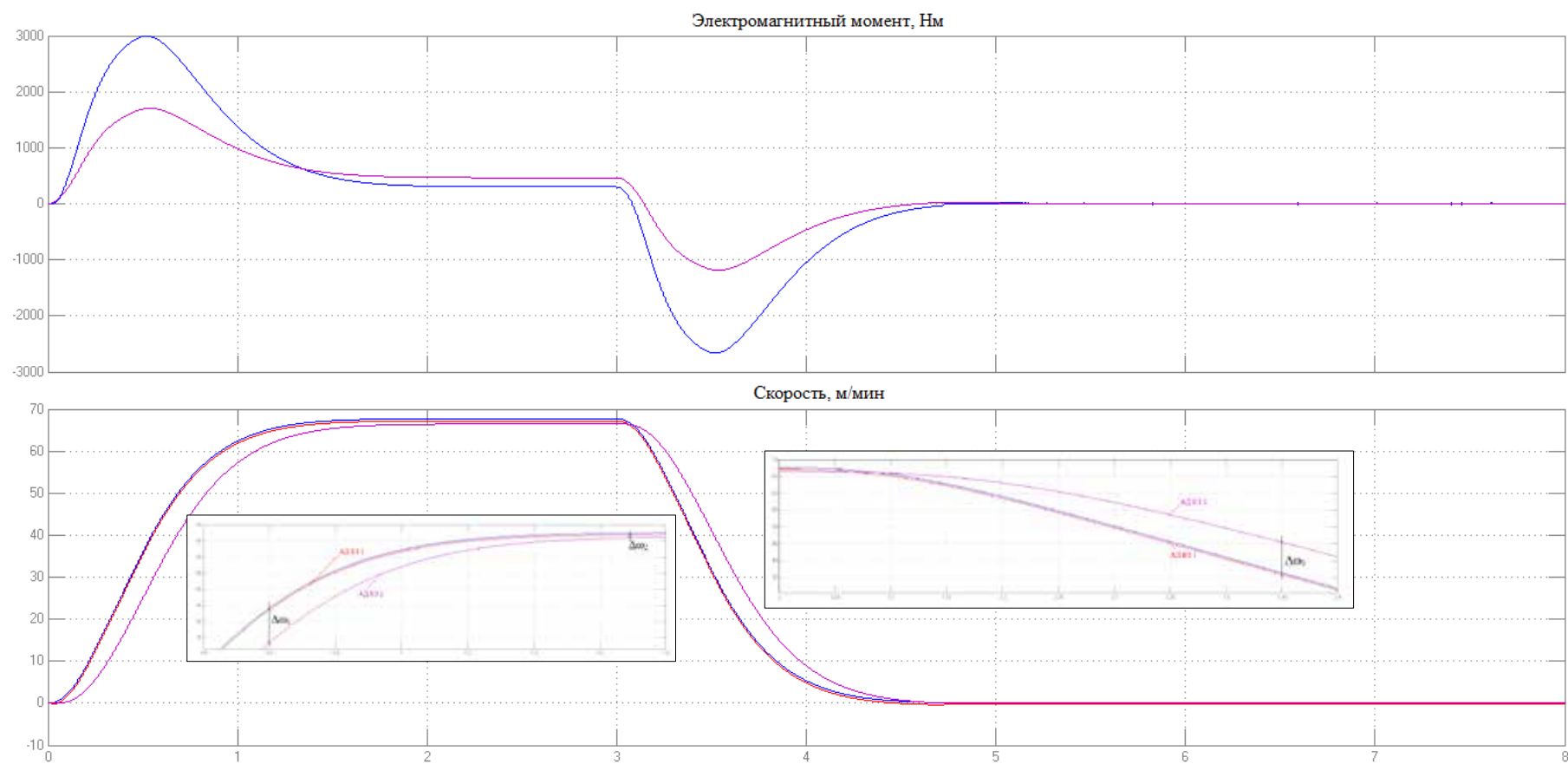


Рисунок 27 - Динамические характеристики $M = f(t)$ и $n = f(t)$ двухдвигательного электропривода при векторном управлении с обратной связью по скорости одного двигателя

При разгоне

$$S_1 = \frac{v_{\partial\partial 1} \times t}{60} = \frac{43,8 \times 1}{60} = 0,73 \text{ м};$$

$$S_2 = \frac{v_{\partial\partial 2} \times t}{60} = \frac{33,5 \times 1}{60} = 0,56 \text{ м};$$

$$S = S_1 - S_2 = 0,73 - 0,56 = 0,17 \text{ м}.$$

При равномерном движении

$$S_1 = \frac{v_{\partial\partial 1} \times t}{60} = \frac{67,05 \times 1}{60} = 1,1175 \text{ м};$$

$$S_2 = \frac{v_{\partial\partial 2} \times t}{60} = \frac{66,1 \times 1}{60} = 1,1017 \text{ м};$$

$$S = S_1 - S_2 = 1,1175 - 1,1017 = 0,0158 \text{ м}.$$

При торможении

$$S_1 = \frac{v_{\partial\partial 1} \times t}{60} = \frac{36,1 \times 1}{60} = 0,6017 \text{ м};$$

$$S_2 = \frac{v_{\partial\partial 2} \times t}{60} = \frac{45,4 \times 1}{60} = 0,7567 \text{ м};$$

$$S = S_1 - S_2 = 0,6017 - 0,7567 = 0,155 \text{ м}.$$

Для данного способа управления характерно существенное рассогласование скоростей вращения двигателей, а значит, движение опор, при разгоне и торможении. Режим работы при векторном управлении с обратной связью по скорости одного двигателя соответствует нагрузочной диаграмме (рисунок 6).

4.4.3 Векторное управление с обратной связью по скорости каждого асинхронного двигателя

Модель двухдвигательного электропривода при векторном управлении с обратной связью для каждого двигателя, состоящая из S-задатчика скорости, контуров скорости, тока и потокосцепления (для каждого двигателя), электромеханических преобразователей (АД КЗ 1 и АД КЗ 2) и механической части представлена на рисунке 28.

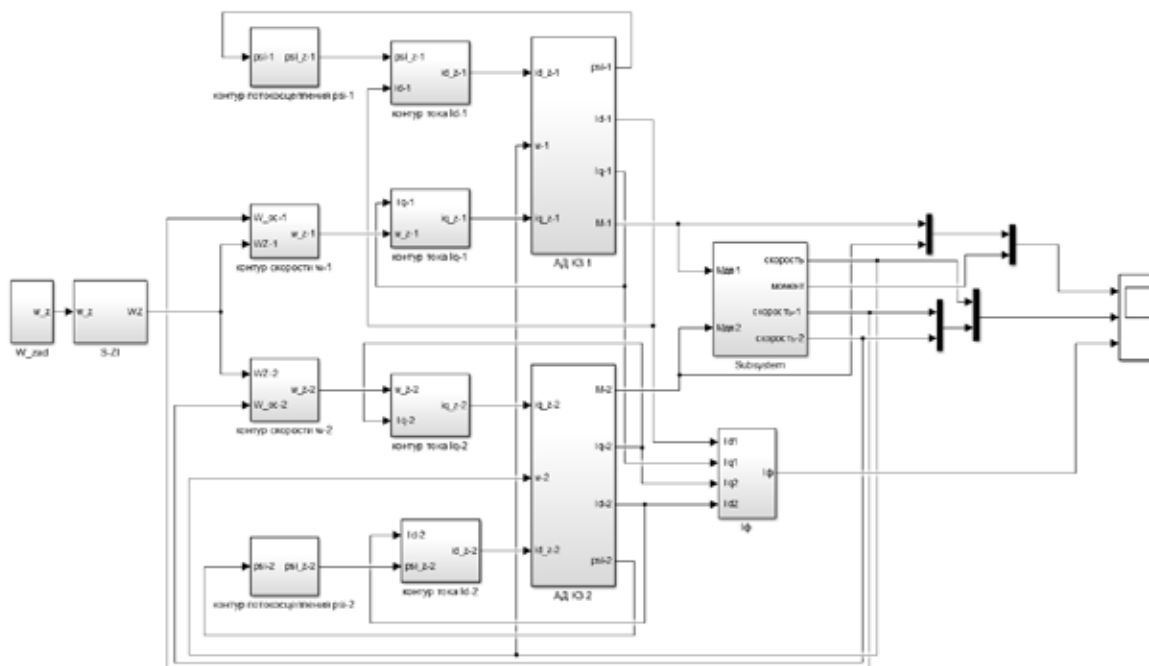


Рисунок 28 - Модель двухдвигательного электропривода при векторном управлении с обратной связью для каждого двигателя

Динамические характеристики двухдвигательного электропривода при векторном управлении с обратной связью по скорости для каждого двигателя приведены на рисунке 28.

Из рисунка 29 видно, что при загрузке одного двигателя больше чем другого, скорость вращения электроприводов остается одинаковой, а значит исключается возможность повреждения конструкции крана.

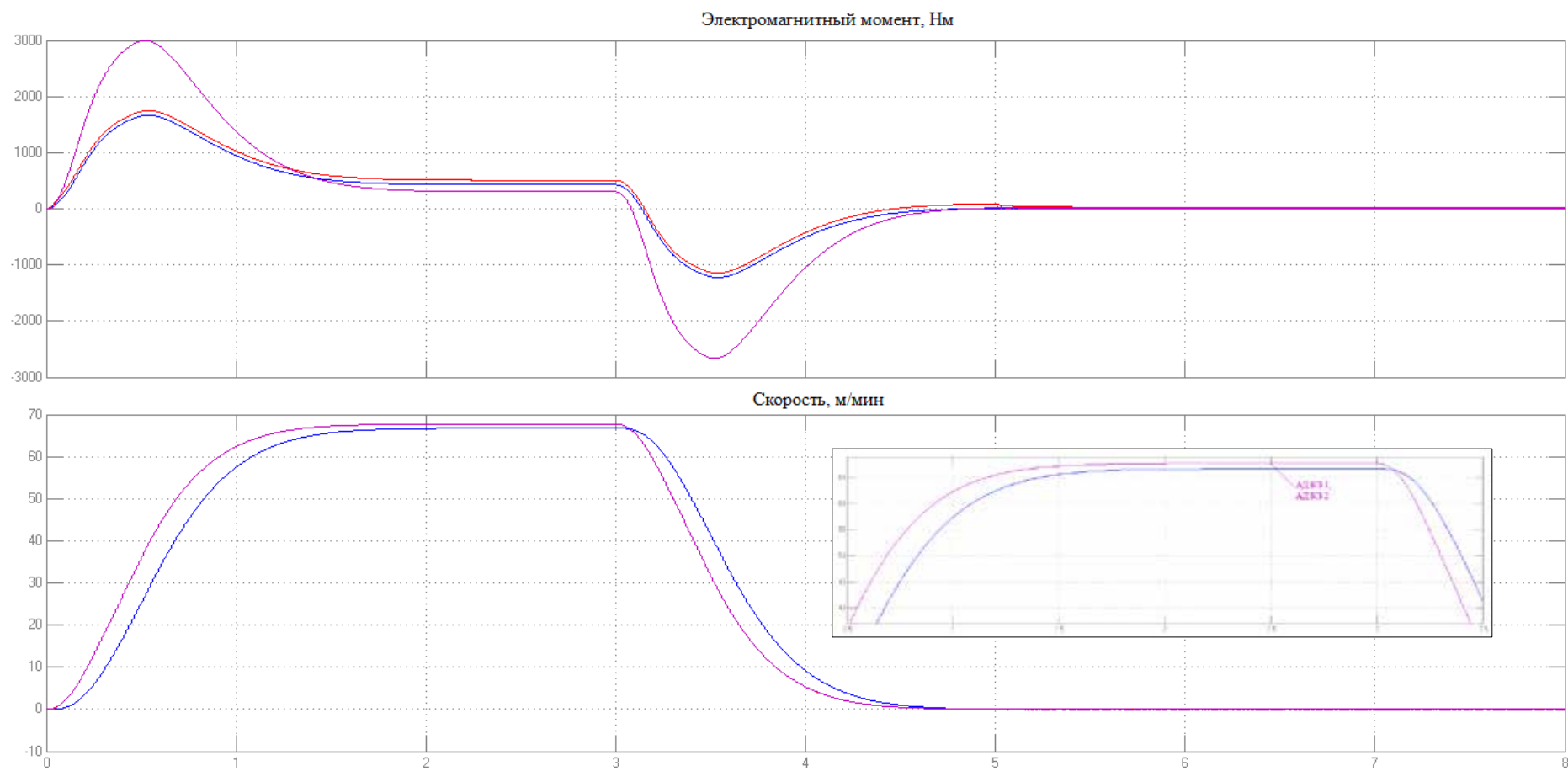


Рисунок 29 - Динамические характеристики $M = f(t)$ и $n = f(t)$ двухдвигательного электропривода при векторном управлении с обратной связью для каждого двигателя

Выводы по разделу:

1. Разработана на основе системы математических уравнений структурная модель асинхронного двигателя во вращающейся системе координат d, q .
2. Произведено исследование полученных в программе MATLAB переходных процессов момента и скорости асинхронного двигателя мощностью 7,5 кВт, согласно структурной библиотечной модели. В результате наблюдается устойчивость в режиме пуска и наброса нагрузки через 0,25 секунд до номинальной скорости.
3. Произведено исследование полученных в программе MATLAB переходных процессов момента и скорости асинхронного двигателя мощностью 7,5 кВт, согласно структурной модели во вращающейся системе координат d, q . В результате наблюдается устойчивость в режиме пуска и наброса нагрузки через 0,25 секунд до номинальной скорости.
4. Произведен сравнительный анализ трех систем управления двухдвигательным электроприводом: скалярное (U/f регулирование), векторное с обратной связью по скорости одного двигателя и с обратной связью по скорости каждого асинхронного двигателя. Следует отметить, что при векторном управлении режим работы двухдвигательного электропривода механизма перемещения козлового крана будет соответствовать рисунку 6, а при скалярном управлении – нет.
5. Заданным требованиям – синхронизация скорости вращения двигателей с целью исключения повреждений конструкции крана – отвечает модель привода векторного управления с обратной связью по скорости каждого асинхронного двигателя.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
З-5Г4Б1	Твердоступу Сергею Александровичу

Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение школы	ОЭЭ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление	13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость затрат технического проекта (ТП)	<i>Затраты на Материальные затраты определяются согласно прейскурантам. Заработная плата определяется исходя из тарифной ставки и коэффициентов, зависящих от различных условий: организация, регион. Страховые отчисления определяются согласно Федеральному закону от 24.07.2009 №212-ФЗ.</i>
2. Продолжительность выполнения ТП	<i>По приблизительной оценке, продолжительность ТП составляет 108 рабочих день</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка потенциала и перспективности реализации технического проекта (ТП) с позиции ресурсоэффективности	<i>Потенциал и перспективность реализации ТП оценивается проведением SWOT-анализа, а ресурсоэффективность ТП с помощью интегральной оценки ресурсоэффективности.</i>
2. Планирование графика работ по реализации ТП	<i>При составлении графика работ по реализации ТП используется оценка трудоемкости работ для каждого исполнителя. По полученным данным составляется ленточная диаграмма Ганта.</i>
3. Составление сметы ТП	<i>При составлении сметы ТП используется следующая группировка затрат по статьям: - материальные затраты; - полная заработная плата исполнителей; - отчисления во внебюджетные страховые фонды; - накладные расходы .</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей);

Диаграмма Ганта

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	30.04.2019 г.
--	---------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Мелик-Гайказян Мария Вигеновна	к.э.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
З-5Г4Б1	Твердоступ Сергей Александрович		

5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Целью данного раздела является обоснование целесообразного использования технического проекта, выполняемого в рамках выпускной квалификационной работы, при этом детально рассматриваются планово-временные и материальные показатели процесса проектирования.

Достижение цели обеспечивается решением следующих задач:

- Составление SWOT-анализа работы и эксплуатации частотно-регулируемого электропривода механизма передвижения козлового крана
- Планирование технико-конструкторских работ
- Определение ресурсной (ресурсосберегающей) эффективности проекта.

5.1 SWOT-анализ работы частотно-регулируемого электропривода механизма передвижения козлового крана

SWOT-анализ является инструментом стратегического менеджмента и представляет собой комплексное исследование технического проекта.

Применительно к проектируемому частотно-регулируемому электроприводу механизма передвижения козлового крана, SWOT-анализ позволит оценить сильные и слабые стороны проекта, а также его возможности и угрозы.

Для проведения SWOT-анализа составляется матрица SWOT, в которую записываются слабые и сильные стороны проекта, а также возможности и угрозы.

При составлении матрицы SWOT удобно использовать следующие обозначения:

С – сильные стороны проекта;

Сл – слабые стороны проекта;

В – возможности;

У – угрозы;

Матрица SWOT приведена в таблице 5.1.

Таблица 5.1. - Матрица SWOT

	Сильные стороны проекта: С1. Высокая энергоэффективность и энергосбережение технологии. С2. Отсутствие щеточно-коллекторного узла С3. Экологичность технологии С4. Низкие вибро-шумовые характеристики С5. Низкие массогабаритные показатели	Слабые стороны проекта: Сл1. Обеспечение равномерного распределения нагрузок между двигателями Сл2. . Высокая цена на оборудование и комплектующие Сл3.Высокая техническая ответственность электрооборудования
Возможности: В1. Увеличение производительности электрооборудования В2. Гибкое управление крановыми механизмами В3. Снижение затрат на техническом обслуживании В4. Автоматизация технологического процесса	 В1С2С3С4; В2С1С2С4; В3С2С5; В4С1С2С3С5;	 В1Сл2;Сл3; В2Сл2; В3Сл1Сл2; В4Сл1Сл2Сл3
Угрозы: У1. Отсутствие спроса на технологии производства У2. Риск несвоевременной поставки оборудования У3. Введения дополнительных государственных требований к стандартизации и сертификации продукции У4. Угрозы выхода из строя сложного энергоемкого оборудования	 У1С5; У3С2;	 У1Сл1Сл2Сл3; У3Сл1Сл2; У4Сл1Сл3

На основании матрицы SWOT строятся интерактивные матрицы возможностей и угроз, позволяющие оценить эффективность проекта, а также надежность его реализации.

При построении интерактивных матриц используются обозначения аналогичные самой матрицы SWOT с дополнением знаков (+,-) для подробного представления наличия возможностей и угроз проекта («+» – сильное соответствие; «-» – слабое соответствие).

Анализ интерактивных матриц приведен в таблицах 5.2 и 5.3.

Таблица 5.2 – Интерактивная матрица возможностей

Возможности	Сильные стороны проекта				
	C1	C2	C3	C4	C5
B1	-	+	+	+	-
B2	+	+	-	+	-
B3	-	+	-	-	+
B4	+	+	+	-	+
Возможности	Слабые стороны проекта				
	Сл1	Сл2	Сл3		
B1	-	+	+		
B2	-	+	-		
B3	+	+	-		
B4	+	+	+		

Таблица 5.3 – Интерактивная матрица угроз

Угрозы	Сильные стороны проекта				
	C1	C2	C3	C4	C5
У1	-	-	-	-	+
У2	-	-	-	-	-
У3	-	+	-	-	-
У4	+	+	+	-	+
Угрозы	Слабые стороны проекта				
	Сл1	Сл2	Сл3		
У1	+	+	+		
У2	-	-	-		
У3	+	+	-		
У4	+		+		

При разработке технического проекта инженер нацелен на проектирование с возможно большим внедрением сильных сторон. Это влияет, прежде

всего, на качество и востребованность спроектированной системы электро-снабжения, что немало важно для потребителей.

Несмотря на то, что для данного анализа сильных сторон больше, не исключен случай, когда какая-либо одна из слабых сторон окажется наиболее сильным фактором, негативно влияющим на работу системы электроснабжения, чем все вместе взятые сильные стороны. Для данного случая таким фактором может быть Сл2 - «Высокая цена на оборудование и комплектующие». К примеру, при любом проектировании электрооборудования простой конструкции требуется использование дорогостоящих составляющих в силу их предварительной проектировки. Но за счет появления новых возможностей, закупка такого оборудования становится целесообразной, так как их преимущества минимизируют влияние слабых сторон.

5.2 Организация работ технического проекта

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- ¾ определение структуры работ в рамках технического проектирования;
- ¾ определение участников каждой работы;
- ¾ установление продолжительности работ;
- ¾ построение графика проведения проектирования частотно-регулируемого электропривода механизма передвижения козлового крана.

5.2.1 Структура работ в рамках технического проектирования

Для выполнения проектирования формируется рабочая группа, в состав которой входят научный руководитель и дипломник. Составлен перечень этапов и работ в рамках проведения проектирования и произведено распределение исполнителей по видам работ.

Номерам этапов соответствуют следующие виды выполняемых работ, представленные в таблице 5.4:

№ 1 – Составление и утверждение технического задания – включает в себя изучение первичной информации об объекте, формулировку требований к техническому проекту, составление задания и плана на работу;

№ 2 – Подбор и изучение материалов по теме – ознакомление с предметом работы, изучение различных источников, касающихся различных сторон технического проекта;

№ 3 – Выбор оборудования и расчет электропривода;

№ 4 – Оптимизация контуров регулирования;

№ 5 – Разработка имитационной модели электропривода;

№ 6 – Оценка эффективности полученных результатов – проверка соответствия выполненного проекта исходным требованиям с учетом ресурсо- и энергоэффективности;

№ 7 – Составление пояснительной записки – оформление результатов проектной деятельности;

№ 8 – Проверка выпускной квалификационной работы руководителем - в рамках учебно-практической работы, включает в себя окончательную проверку руководителем, устранение недочетов дипломником;

№ 9 – Подготовка к защите ВКР – подготовка презентации, согласование с преподавателем для защиты перед аттестационной государственной комиссией.

5.2.2 Определение трудоемкости выполнения ТП

Трудоемкость выполнения технического проекта оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожи}$ используется следующая формула.[17]

$$t_{ожи} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5},$$

где $t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн. Результаты продолжительности выполнения работ приведены в таблице 5.4.

5.2.3 Разработка графика проведения технического проекта

Наиболее удобным и наглядным в данном случае является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. [17]

График строится для ожидаемого по длительности исполнения работ в рамках технического проекта, с разбивкой по месяцам и декадам за период времени подготовки ВКР. На основе таблицы 5.4 строим план-график проведения работ (таблица 5.5).

Исходя из составленной диаграммы, можно сделать вывод, что продолжительность работ занимает 12 декад, начиная со второй декады февраля, заканчивая первой декадой июня. Продолжительность выполнения технического проекта составит 108 дней. Из них:

106 дней – продолжительность выполнения работ дипломника;

7 дней – продолжительность выполнения работ руководителя;

Таблица 5.4 – Расчет продолжительности работ, раб.дн.

№ ра- боты	Название работы	Исполнители	Минимально возможная трудоемкость (t_{min})	Максимально возможная трудоемкость (t_{max})	Ожидаемая трудоемкость ($t_{ож}$)
1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель	1	1	1
2	Подбор и изучение материалов по теме	Дипломник	8	10	9
3	Выбор оборудования и расчет электропривода	Дипломник	24	28	27
4	Оптимизация контуров регулирования	Научный руководитель	1	1	1
		Дипломник	25	32	28
5	Разработка имитационной модели электропривода	Научный руководитель	1	1	1
		Дипломник	20	24	22
6	Оценка эффективности полученных результатов	Научный руководитель	1	1	1
		Дипломник	3	7	5
7	Составление пояснительной записки	Дипломник	7	14	10
8	Проверка выпускной квалификационной работы руководителем	Научный руководитель	1	1	1
9	Сдача и защита выпускной квалификационной работы	Научный руководитель	2	2	2
		Дипломник	4	6	5

Таблица 5.5 – Диаграмма Ганта

№	Вид работ	Исполнители	T_{pi} , раб. дн.	Продолжительность выполнения работ												
				Февр.		Март			Апрель			Май			Июнь	
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	1	-												
2	Подбор и изучение материалов по теме	Дипломник	9	-												
3	Выбор оборудования и расчет электропривода	Дипломник	27		-	-	-									
4	Оптимизация контуров регулирования	Руководитель	1							-						
		Дипломник	28					-	-	-						
5	Разработка имитационной модели электропривода	Руководитель	1									-				
		Дипломник	22							-	-	-				
6	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель	1										-			
		Дипломник	5									-				
7	Составление пояснительной записки	Дипломник	10										-	-		
8	Проверка выпускной квалификационной работы руководителем	Руководитель	1											-		
9	Сдача и защита выпускной квалификационной работы	Руководитель	2												-	
		Дипломник	5												-	

5.3 Составление сметы затрат на разработку ТП

Смета затрат включает в себя следующие статьи:

- материальные затраты;
- полная заработная плата исполнителей технического проекта;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

5.3.1 Расчет материальных затрат

В материальные затраты включаются затраты на канцелярские принадлежности, информационные носители (флеш-карты), картриджи и т.п.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$З_{\text{м}} = \sum_{i=1}^m \text{Ц}_i \times N_{\text{расх}i},$$

где m – количество видов материальных ресурсов;

$N_{\text{расх}i}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию (натур.ед.);

Ц_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./натур.ед.);

Значения цен на материальные ресурсы установлены по данным, размещенным на сайте канцелярского магазина ООО ТД БиК „Канцлер”.

Таблица 5.6 – Материальные затраты

Наименование	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, руб.
Упаковка бумаги	1	320	320
Ручка	2	60	120
Папка	1	60	60
Степлер	1	130	130
Калькулятор	1	570	570
Итого			1200

5.3.2 Расчет полной заработной платы исполнителей темы

Полная заработная плата включает основную и дополнительную заработную плату и определяется как:

$$З_{полн} = З_{осн} + З_{доп},$$

где $З_{осн}$ – основная заработная плата;

$З_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ($З_{осн}$) исполнителя рассчитывается исходя из трудоемкости работ и квалифицированных исполнителей по следующей формуле:

$$З_{осн} = З_{дн} \times T_p,$$

где $З_{осн}$ – основная заработная плата одного работника;

$З_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дн.;

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{дн} = \frac{З_m}{D_{мес}},$$

где $З_m$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

$D_{мес}$ – количество рабочих дней, раб. дн.

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Оклад,руб.	Месячный основной оклад работника руб.	Средняя заработная плата работника руб.	Продолжительность работ, выполняемых работником раб. дн.	Основная заработная плата одного работника руб.
Руководитель	33664	43763	1683	7	11781
Бакалавр	12300	15990	615	106	65190
Итого					76971

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \times З_{\text{осн}}$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Расчёт полной заработной платы приведён в таблице 5.8.

Таблица 5.8 – Расчет полной заработной платы

Исполнители	Коэффициент дополнительной заработной платы, руб.	Основная заработная плата одного работника руб.	Дополнительная заработная плата руб.	Полная заработная плата руб.
Руководитель	15%	11781	1767	13600
Бакалавр	12%	65190	7823	73000
Итого:				86600

5.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \times (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}),$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2019 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30,2 %.

Отчисления во внебюджетные фонды составят:

$$З_{внеб} = 0,302 \cdot 86,6 = 26,2 \text{ тыс. руб.}$$

5.3.4 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не включенные в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина составляет 16% от общей суммы затрат на проектирование.

5.4 Формирование сметы затрат технического проекта

Рассчитанная величина затрат технического проекта является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при заключении договора с заказчиком защищается организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку технической продукции.

Определение бюджета затрат на технический проект приведен в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Смета затрат технического проекта

Наименование статьи	Сумма, тыс. руб.	Структура затрат, %
1. Материальные затраты ТП	1,2	0,9
2. Затраты по полной заработной плате исполнителей темы	86,6	64,0
3. Отчисления во внебюджетные фонды	26,2	19,1
4. Накладные расходы	22	16,0
5. Итого	136	100,0

В ходе выполнения данного параграфа была рассчитана продолжительность выполнения технического проекта, которая составляет 106 раб. дней для

инженера и 7 для руководителя. Составлен календарный график выполнения работ. Смета затрат на разработку технического проекта составляет 136 тыс.руб, из которых более половины (64 %) составляют затраты на оплату труда. Все результаты проекта оказались ожидаемы и могут быть реализованы.

5.5 Определение ресурсоэффективности проекта

Определение ресурсоэффективности проекта можно оценить с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности по формуле [17]:

$$I_{pi} = \sum a_i \times b_i$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности;

a_i – весовой коэффициент разработки;

b_i – балльная оценка разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

Оценку характеристик проекта проведем на основе критериев, соответствующих требованиям к электрооборудованию:

1. Безопасность: обеспечение безопасности работ, как для электротехнического персонала, так и для не электротехнического.
2. Удобство эксплуатации: массогабаритные показатели, возможность транспортировки, простота монтажа.
3. Помехоустойчивость: устойчивость ПЧ к внешним электрическим сигналам.
4. Энергосбережение: использование меньшего количества энергии для обеспечения установленного уровня производительности в технологических процессах.

5. Надежность: бесперебойная работоспособность рабочего органа в пределах допустимых показателей его производительности и исключение ситуаций, опасных для людей и окружающей среды.

6. Материалоёмкость: использование меньшего количества активных материалов при изготовлении.

Критерии ресурсоэффективности и их количественные характеристики приведены в таблице 5.10.

Таблица 5.10 - Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Балльная оценка разработки
1. Безопасность	0,15	4
2. Удобство эксплуатации	0,10	4
3. Помехоустойчивость	0,15	5
4. Энергосбережение	0,20	5
5. Надежность	0,20	5
6. Материалоёмкость	0,20	5
Итого:	1,00	

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности технического проекта составит:

$$I_{p-исп1} = 4 \times 0,15 + 4 \times 0,1 + 5 \times 0,15 + 5 \times 0,2 + 5 \times 0,2 + 5 \times 0,2 = 4,75$$

Показатель ресурсоэффективности проекта имеет достаточно высокое значение (по 5-балльной шкале), что говорит об эффективности использования технического проекта. Высокие баллы надежности и производительности позволяют судить об эффективности системы.

В результате выполнения поставленных задач по данному разделу, можно сделать следующие выводы:

- в результате проведения SWOT-анализа были выявлены сильные и слабые стороны выбора технического проекта. Установлено, что технический проект имеет несколько важных преимуществ, обеспечивающих повышение

производительности, безопасности и экономичности технического производства.

- при планировании технических работ был разработан график занятости для двух исполнителей, составлена ленточная диаграмма Ганта, позволяющая оптимально скоординировать работу исполнителя.

- составление сметы технического проекта позволило оценить первоначальную сумму затрат на реализацию технического проекта.

- оценка ресурсоэффективности проекта, проведенная по интегральному показателю, дала высокий результат (4,75 по 5-балльной шкале), что говорит об эффективности реализации технического проекта.

Реализация данного технического проекта, позволяет увеличить эффективность технологического процесса механизма передвижения козлового крана путем внедрения более универсального оборудования, требующего меньше затрат при эксплуатации.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г4Б1	Твердоступу Сергею Александровичу

Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение школы	ОЭЭ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление	13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования.	<i>Объектом исследования является электропривод механизма перемещения грузоподъемных машин ЛТ-62.</i>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	- Право на условие труда, отвечающие требованиям безопасности и гигиены.
2. Производственная безопасность 2.1. Анализ потенциально возможных вредных факторов проектируемой производственной среды. 2.2. Анализ потенциально возможных опасных факторов проектируемой производственной среды.	<i>Вредные факторы при эксплуатации электропривода грузоподъемных машин, в основном, связаны:</i> - с повышенным уровнем шума, - с повышенным уровнем вибрации, - с повышенным электромагнитным излучением, - с неудовлетворительными метеорологическими условиями. <i>Опасности при эксплуатации грузоподъемных машин, в основном, связаны:</i> - с электрическим током, - с непреднамеренным контактом человека с движущимися частями оборудования, - с возможными ударами от падающих предметов при обрыве поднимаемого груза, - с высыпанием части груза, - с падением грузоподъемных машин, - с наездом и ударами при столкновении с передвижными грузоподъемными машинами
3. Экологическая безопасность:	- Бытовые отходы. Отходы, образующиеся при поломке элементов электропривода.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	- Возможные ЧС: пожар.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель отделения общетехнических дисциплин	Гуляев Милий Всеволодович			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г4Б1	Твердоступ Сергей Александрович		

6 Социальная ответственность

Введение

В данном дипломном проекте проектируется электропривод механизма перемещения грузоподъемных машин ЛТ-62.

Подъемно-транспортные механизмы, представляют собой большую группу механизмов общепромышленного назначения, выполняющих разнообразные погрузочно-разгрузочные операции. К ним относятся краны - мостовые, козловые, башенные, поворотные и т.д. Среди этих механизмов в наиболее тяжелых условиях и интенсивных режимах работают козловые краны.

Козловые краны оснащены системами двухдвигательного электропривода. В их числе привода, обеспечивающие горизонтальное передвижение самого крана. Таковыми являются механизмы передвижения.

Привода устанавливаются у основания стоек, представляющих собой несущую часть крана. Основным требованием к данному механизму является согласованное передвижение опор козлового крана при одинаковой скорости вращения электроприводов. Поэтому, на основе данного требования, необходимо применение специальной системы согласования приводов. Механизмы передвижения являются единственными, где необходима система согласования или синхронизации.

В дипломном проекте производится выбор электродвигателя и преобразователя частоты, расчет параметров схемы замещения и получение электромеханических характеристик электродвигателя.

Так же разрабатывается модель в программной среде Simulink Matlab, позволяющую имитировать двухдвигательный электропривод механизма передвижения козлового крана, включая два преобразователя частоты, два двигателя, реактивную нагрузку, контура обратных связей.

В данном разделе рассматриваются опасности при эксплуатации электропривода механизма перемещения грузоподъемных машин ЛТ-62.

6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Для осуществления практической деятельности в области обеспечения безопасности жизнедеятельности необходимо соблюдение нормативов и правил ведения соответствующих работ, позволяющие их обеспечить.

В течение рабочего дня (смены) работнику должен быть предоставлен перерыв для отдыха и питания продолжительностью не более 2 часов и не менее 30 минут, которые не включаются в рабочее время. Время предоставления перерыва и его конкретная продолжительность устанавливаются правилами внутреннего трудового распорядка организации или по соглашению между работником и работодателем. На работах, где по условиям производства (работы) предоставление перерыва для отдыха и питания невозможно, работодатель обязан обеспечить работнику возможность отдыха и приема пищи в рабочее время. Перечень таких работ, а также места для отдыха и приема пищи устанавливаются правилами внутреннего трудового распорядка организации (ст. 108 ТК РФ).

Для управления грузоподъемными кранами и их обслуживания приказом руководителя предприятия назначаются обученные и аттестованные крановщики не моложе 18 лет, имеющие образование не ниже 8 классов, годные по состоянию здоровья, что должно быть подтверждено результатами медицинского освидетельствования.

Крановщики мостовых и козловых кранов должны иметь квалификационную группу по электробезопасности не ниже II.

Подготовка и аттестация крановщиков должны проводиться в профессионально-технических училищах, а также на курсах и в технических школах обучения рабочих указанным специальностям, создаваемых на предприятиях (в организациях), располагающих соответствующей базой для теоретического и производственного обучения и имеющих специальное разрешение (лицензию) органов Госгортехнадзора.

6.2 Производственная безопасность

6.2.1 Анализ потенциально возможных вредных факторов проектируемой производственной среды

Вредные факторы при эксплуатации электропривода грузоподъемных машин, в основном, связаны:

- с повышенным уровнем шума,
- с повышенным уровнем вибрации,
- с повышенным электромагнитным излучением,
- с неудовлетворительными метеорологическими условиями.

В дипломной работе рассматривается электропривод механизма перемещения козлового крана ЛТ-62, установленного на открытой территории.

В рабочей зоне осуществляется естественная вентиляция. Основным недостаток - воздух не подвержен предварительной очистки и нагреванию.

Влияние климата на самочувствие человека значимо и существенно, а переносимость температуры во многом зависит от скорости движения и влажности окружающего воздуха.

При длительном пребывании человека в условиях высокой температуры повышаются температура тела, частота сердечных сокращений изменяется, повышается или снижается артериальное давление, нарушаются обменные процессы, особенно водно-солевой, функциональное состояние

органов желудочно-кишечного тракта. Одновременно значительно снижается умственная и физическая работоспособность.

Длительное воздействие относительно низких температур воздуха или кратковременные воздействия особенно низких температур вызывают значительные нарушения функционального состояния. Физические нагрузки при пониженных температурах вызывают ухудшение эластичности и сократительной способности мышц и связок, что является одной из причин травматических повреждений опорно-двигательного аппарата.

Человек будет чувствовать себя абсолютно комфортно, если влажность окружающего его воздуха будет колебаться в пределах от 40 до 60%. Это и есть нормальная влажность воздуха. В случаях снижения влажности ниже 40%, практически все здоровые люди начинают испытывать сонливость, рассеянность, ощущать чувство сухости кожи и раздражение слизистых оболочек.

По ГОСТ 12.1.005 – 88 оптимальная норма относительной влажности воздуха в рабочих местах при тяжелых категориях работ составляет 40-60 %. Допустимая норма относительной влажности воздуха при тяжелых категориях работ в холодный период года не более 75%, в теплый период года не более 65% (при 26⁰C).

Для защиты от повышенной влажности воздуха в козловых кранах предусмотрена система вентиляции - механическая, приточно-вытяжная.

Из наиболее распространенных в производстве вредных факторов являются шум и вибрации. В данной работе следует выделить следующие группы источников:

- шум механического происхождения, возникающий при вибрации поверхностей оборудования, а также при одинарных или периодических ударах в соединениях деталей и или конструкциях;

- шум электромагнитного происхождения, возникающий вследствие колебаний электрических устройств (ротора, статора) под действием переменных магнитных полей.

Шум и вибрация вызывают головную боль, быструю утомляемость, бессонницу или сонливость, ослабляет внимание, ухудшается память, снижается реакция. По при выполнении основной работы уровень звука на рабочем месте не должен превышать 80дБА. Источником вибрации является работающий электромашинный агрегат. По уровень вибрации не должен превышать 88 дБ.

Источником электромагнитных излучений являются системы производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии постоянного и переменного тока (0-3 кГц): кабели электропитания, электропроводка, выпрямители и преобразователи тока. Согласно напряженность электромагнитного поля по электрической составляющей не должна превышать 25В/м в диапазоне от 5Гц до 2кГц. Плотность магнитного потока не должна превышать в диапазоне от 5 Гц до 2 кГц. Поверхностный электростатический потенциал не должен превышать 500В.

Меры защиты от вредных факторов производства:

1 Защита от вибраций:

- ограничение контакта работника с вибрацией.

2 Защита от шума:

- применение наушников.

3 Защита от внешнего облучения:

- регламентированные перерывы.

6.2.2 Анализ потенциально возможных опасных факторов проектируемой производственной среды

Опасности при эксплуатации грузоподъемных машин, в основном, связаны:

- с электрическим током,
- с непреднамеренным контактом человека с движущимися частями оборудования,
- с возможными ударами от падающих предметов при обрыве поднимаемого груза,
- с высыпанием части груза,
- с падением грузоподъемных машин,
- с наездом и ударами при столкновении с передвижными грузоподъемными машинами.

К опасным факторам можно отнести наличие большого количества аппаратуры, использующей электрический ток напряжением 220 В и частотой 50Гц. По опасности электропоражения рабочее место с повышенной опасностью, характеризующиеся наличием следующих условий: возможности одновременного прикосновения человека к соединенным с землей металлическим частям зданий, технологических аппаратов, механизмов, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования — с другой.

Во время нормального режима работы оборудования опасность электропоражения крайне мала, однако, возможны аварийные режимы работы, когда происходит случайное электрическое соединение частей оборудования, находящегося под напряжением с заземленными конструкциями.

Поражение человека электрическим током может произойти в следующих случаях:

- прикосновение к токоведущим частям, оголенным проводам, контактам электроприборов, рубильников, предохранителей, находящихся под напряжением;
- прикосновение к частям электрооборудования, металлическим конструкциям сооружений и т.п., в обычном состоянии не находящихся, но в результате повреждения (пробоя) изоляции оказавшихся под напряжением;
- нахождение вблизи места соединения с землей оборванного провода электросети;
- несогласованные и ошибочные действия персонала (подача напряжения на установку, где работают люди; оставление установки под напряжением без надзора; допуск к работам на отключенном электрооборудовании без проверки отсутствия напряжения и т.д.).

Основными мероприятиями по обеспечению электробезопасности являются:

- изолирование (ограждение) токоведущих частей, исключающее возможность случайного прикосновения к ним;
- установки защитного заземления;
- наличие общего рубильника;
- своевременный осмотр технического оборудования, изоляции.

К опасным факторам также относятся движущиеся части машин и механизмов. В качестве механических опасностей обозначаются все физические факторы, которые могут привести к травмам от механического движения деталей машины. Основными видами механических опасностей являются: прижатие или раздавливание; порезы; разрезание или разрубание; защемление или наматывание; втягивание; попадание под удар; поверхностное повреждение или существенное сдирание наружных тканей под действием трения.

Средствами защиты могут служить:

1. Обеспечение недоступности опасной зоны;
2. Уменьшение опасности при помощи специальных приспособлений к которым относятся:

- ограждения (кожухи, козырьки, дверцы, экраны, щиты, барьеры и т. д.);
- предохранительные – блокировочные устройства (механические, электрические, электронные, пневматические, гидравлические и т. д.);
- тормозные устройства (рабочие, стояночные, экстренного торможения);
- сигнальные устройства (звуковые, световые), которые могут встраиваться в оборудование или быть составными элементами. [1]

Опасными факторами также являются:

- опасность опрокидывания крана – возникает при потере краном равновесия, что может повлечь за собой человеческие жертвы, разрушение сооружений и технических устройств. На устойчивость крана влияет также устройство площадок выполнения грузоподъёмных работ. Строгое соблюдение всех норм, определённых в регламенте проведения погрузочно-разгрузочных работ позволяет обеспечивать безопасность опрокидывания крана.

- опасность падения груза - является одной из самых распространённых опасностей при эксплуатации грузоподъёмных машин. Чаще всего эта опасность связана с неправильной строповкой груза, разрывом канатов и неисправности грузозахватных механизмов. Для обеспечения безопасности следует проводить обследование крана и устройств для проведения работ, соблюдать правила строповки и эксплуатации кранов, соблюдать технику безопасности.

6.3 Экологическая безопасность

Рабочий механизм содержит огромное количество компонентов, которые содержат вредные вещества и представляют угрозу, как для человека, так и для окружающей среды.

К таким веществам относятся:

- свинец (накапливается в организме, поражая почки, нервную систему);
- никель и цинк (могут вызывать дерматит);
- щелочи (прожигают слизистые оболочки и кожу).

Поэтому электродвигатель требует специальных комплексных методов утилизации. В этот комплекс мероприятий входят:

- отделение металлических частей от неметаллических;
- металлические части переплавляются для последующего производства;
- неметаллические части подвергаются специально переработке.

В настоящее время ведется создания и внедрения безотходной технологии в ряде отраслей промышленности, однако полный перевод ведущих отраслей промышленности на безотходную технологию потребует решения большого комплекса весьма сложных технологических, конструкторских и организационных задач.

6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Рабочий механизм, который рассматривается в работе, имеет электропроводку напряжением 220 вольт, предназначенную для питания электродвигателя. При неправильной эксплуатации оборудования и коротком замыкании электрической цепи может произойти возгорание, которое грозит уничтожением техники, документов и другого имеющегося оборудования.

Данное рабочее место относится к категории ДН (установка относится к категории ДН, если в ней присутствуют (хранятся, перерабатываются, транспортируются) в основном негорючие вещества и (или) материалы в холодном состоянии и если по перечисленным выше критериям она не относится к категории АН, БН, ВН или ГН).

Необходимо проводить следующие пожарно-профилактические мероприятия:

- организационные мероприятия, касающиеся технического процесса с учетом пожарной безопасности объекта;
- эксплуатационные мероприятия, рассматривающие эксплуатацию имеющегося оборудования;
- технические и конструктивные, связанные с правильными размещением и монтажом электрооборудования и отопительных приборов.

Организационные мероприятия:

1. Противопожарный инструктаж обслуживающего персонала;
2. Обучение персонала правилам техники безопасности;
3. Издание инструкций, плакатов, планов эвакуации.

Эксплуатационные мероприятия:

1. Соблюдение эксплуатационных норм оборудования;
2. Обеспечение свободного подхода к оборудованию;

3. Содержание в исправном состоянии изоляции токоведущих проводников.

К техническим мероприятиям относится соблюдение противопожарных требований при устройстве электропроводок, оборудования, систем отопления, вентиляции и освещения.

Если возгорание произошло в электроустановке, для его устранения должны использоваться огнетушители углекислотные типа ОУ-2, или порошковые типа ОП-5. Кроме устранения самого очага пожара нужно, своевременно, организовать эвакуацию людей.

Заключение

В данной выпускной квалификационной работе был разработан частотно-регулируемый асинхронный двухдвигательный электропривод механизма передвижения крана козлового, с реализацией синхронизации скорости движения опор.

В процессе проектирования были изучены вопросы назначения крана его характеристики технические его схема кинематическая, так же особенности козлового крана ЛТ-62. На основании данных была рассчитана нагрузка и выбран двигатель асинхронный АМТКФ132М6 мощностью которого равна 7,5 кВт и частотный преобразователь Schneider Electric Altivar 71. Рассчитаны параметры схемы замещения двигателя и получены его характеристики статические.

С помощью программы Matlab на основании модели математической двухфазной в неподвижной системе координат d, q была разработана модель имитационная двухдвигательного электропривода частотно-регулируемого, которая включает в себя S-образный задатчик интенсивности, контура тока, скорости и потокосцепления, механическую часть и два двигателя.

С использованием модели были проведены всесторонние исследования электропривода двухдвигательного, в результате исследований было установлено, что синхронизацию скорости вращения этих двух двигателей обеспечивает векторное управление с обратными связями по скорости по каждому электродвигателю.

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» выполнен технический проект и решены следующие задачи:

- в результате проведения SWOT-анализа были выявлены сильные и слабые стороны выбора технического проекта. Установлено, что технический проект имеет несколько важных преимуществ, обеспечивающих повышение производительности, безопасности экономичности технического производства.

- при планировании технических работ был разработан график занятости для двух исполнителей, составлена ленточная диаграмма Ганта, позволяющая оптимально скоординировать работу исполнителя.

- составление сметы технического проекта позволило оценить первоначальную сумму затрат на реализацию технического проекта.

- оценка ресурсоэффективности проекта, проведенная по интегральному показателю.

В разделе «Социальная ответственность» проанализированы и определены вредные и опасные факторы среды, воздействия негативные на среду окружающую, чрезвычайные ситуации при работе в процессе эксплуатации привода козлового крана.

Список используемой литературы

1. Байбутанов Б.К. Многодвигательный асинхронный электропривод согласованного вращения: Магистерская диссертация. – Алматы; 2013.
2. Теличко Л.Я. Ограничение динамических нагрузок электромеханических систем группы общепромышленных механизмов на металлургических предприятиях: Дисс.докт.техн.наук. – М.; 2006.
3. Теличко Л.Я., Корчагин А.А. Разработка и исследование оптимальной системы двухдвигательного электропривода механизма опрокидывания: Дисс.докт.техн.наук. – Л.; 2011.
4. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.kadrovik.ru/docs/pgosgortehnnadsora31.12.99n98.htm>. – Загл. с экрана.
5. Лой В.Н., Протас П.А., Завойских Г.И. Лесоскладское грузоподъемное оборудование: учеб.метод. пособие для студентов. – Мн.: БГТУ, 2005. – 102 с.
6. Коломинова М. В. Грузоподъемное оборудование для нижнескладских работ: МУ к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Технологические процессы и оборудование лесозаготовительного производства» /М. В. Коломинова. – У.: УГТУ, 2013. – 54 с.
7. Иванченко Ф. К., Красношапка В. А. Динамика металлургических машин. – М.: Металлургия, 1983. – 295 с.
8. Проектирование электроприводов крановых механизмов. Техническая коллекция Schneider Electric. Выпуск № 12, февраль 2009.
9. Казак С.А., Дусье В.Е., Кузнецов и др./Курсовое проектирование грузоподъемных машин. Учебное пособие для студентов машиностроительных специальностей вузов; Под ред. Казака С.А. – М.: Высшая школа, 1989. - 319 с.: ил.

10. Приводы машин: справочник / Длоугий В.В., Муха Т.И., Цупиков А.П., Януш Б.В.; под общ. ред. Длоугого В.В. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. Отд-ние, 1982. – 383 с.
11. Крановые электродвигатели серии ДМТ и АМТ [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.esco-motors.ru/sites/default/files/kr_eldv.pdf. – Загл. с экрана.
12. Электрический привод: учебно-методическое пособие / Качин С.И., Чернышев А.Ю., Качин О.С.; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 157 с.
13. Преобразователи частоты Altivar 71. Каталог 09 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.tesli.com/file/catalogue/schneider-electric/schneider-electric-altivar-71.pdf> – Загл. с экрана.
14. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В.. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: учебное пособие – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 164 с.
15. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В.. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 7. Теория оптимизации непрерывных многоконтурных систем управления электроприводов: учебное пособие – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 164 с.
16. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В.. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 7. Механическая система электропривода: учебное пособие – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 164 с.
17. Коршунова Л. А., Кузьмина Н. Г. Технико-экономическое обоснование инновационного проекта. Методические указания по выполнению экономического раздела ВКР для студентов энергетических специальностей всех форм обучения. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012.

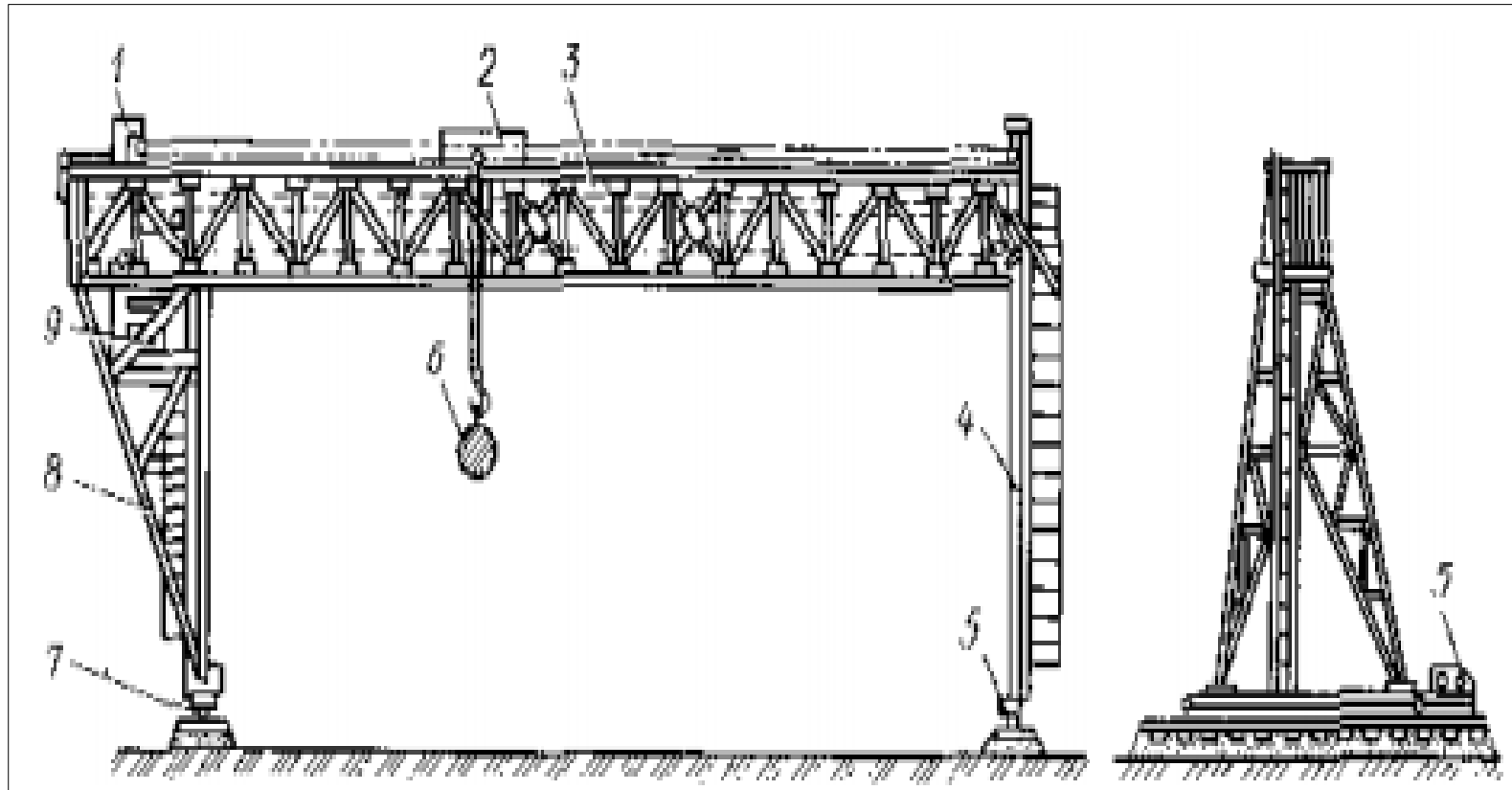
18. Коршунова Л.А., Кузьмина Н.Г. Экономика предприятия и отрасли (в электроэнергетике): учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010.
19. Непомнящий Е.Г. Инвестиционное проектирование: учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003.
20. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (вторая редакция), утверждено Министерство экономики РФ, Министерство финансов РФ № ВК 477 от 21.06.1999 г. [Электронный ресурс]. - Режим доступа. - <http://www.cfin.ru/>
21. Трудовой кодекс. – М.: Проспект, 2014. – 112 с.
22. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – СПб.: ДЕАН, 1999. – 320 с.
23. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. с изм. и дополн. – СПб, 2002. – 123 с.
24. Безопасность жизнедеятельности. Под ред. С.В. Белова. – М.: Высшая школа, 2002. – 357с.
25. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок. 2014г.
26. Основы противопожарной защиты предприятий ГОСТ 12.1.004 и ГОСТ 12.1.010 – 76.
27. Охрана окружающей среды. Под ред. С.В. Белова. – М.: Высшая школа, 1991.
28. ГОСТ 12.2.003-91 – 92. Оборудование производственное. Общие требования безопасности.
29. ГОСТ 12.3.009-76 – 77 ССБТ. Работы погрузочно-разгрузочные. Общие требования.
30. ГОСТ 12.4.026-76 – 78. Света сигнальные и знаки безопасности. Общие требования безопасности.

31. ГОСТ 12.1.003 – 83. ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
32. ГОСТ 12.1.012 –90 ССБТ Вибрационная болезнь. Общие требования.
33. ГОСТ 12.1.019 (с изм. №1) ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
34. ГОСТ 12.1.038 – 82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
35. Р 2.2.2006 – 05. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда. – М.: Минздрав России, 2006.
36. СНиП 3.05.06-85 – 88. Электротехнические устройства.
37. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278 – 03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий. М.: Минздрав России, 2003.
38. СанПиН 2.2.4.548 – 96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. М.: Минздрав России, 1997.
39. СанПиН 2.2.4.1191 – 03. Электромагнитные поля в производственных условиях. М.: Минздрав России, 2003.
40. СН 2.2.4/2.1.8.562 – 96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.
41. СН 2.2.4/2.1.8.566. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. М.: Минздрав России, 1997.

Приложение А

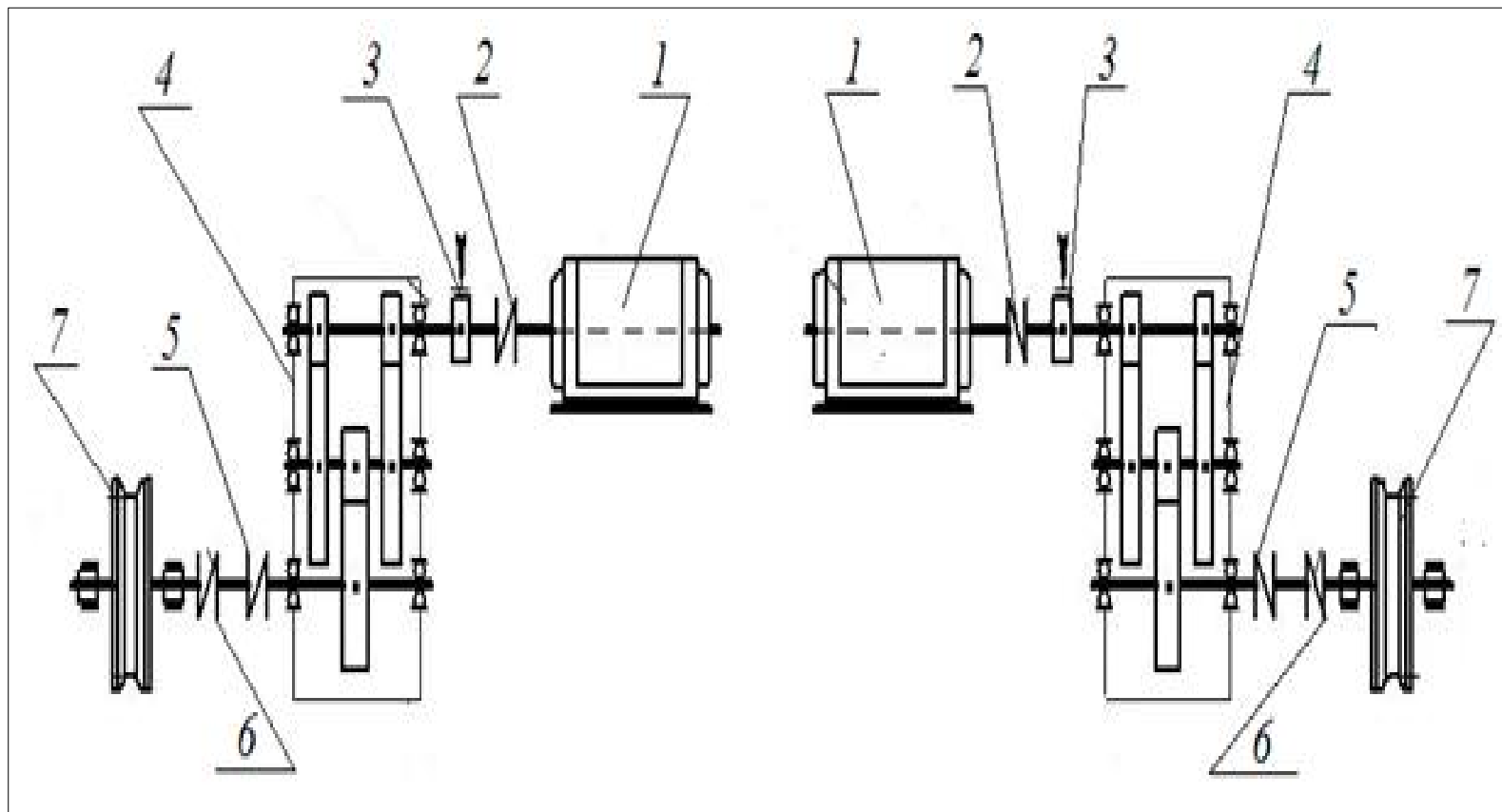
Перечень графического материала.

Конструкция козлового крана ЛТ-62



лебедка 1; грузовая тележка 2; несущая ферма 3; шарнирная опора 4; ходовые тележки 5 и 7; груз 6; жесткая опора 8; кабина крановщика 9

Кинематическая схема механизма передвижения козлового крана



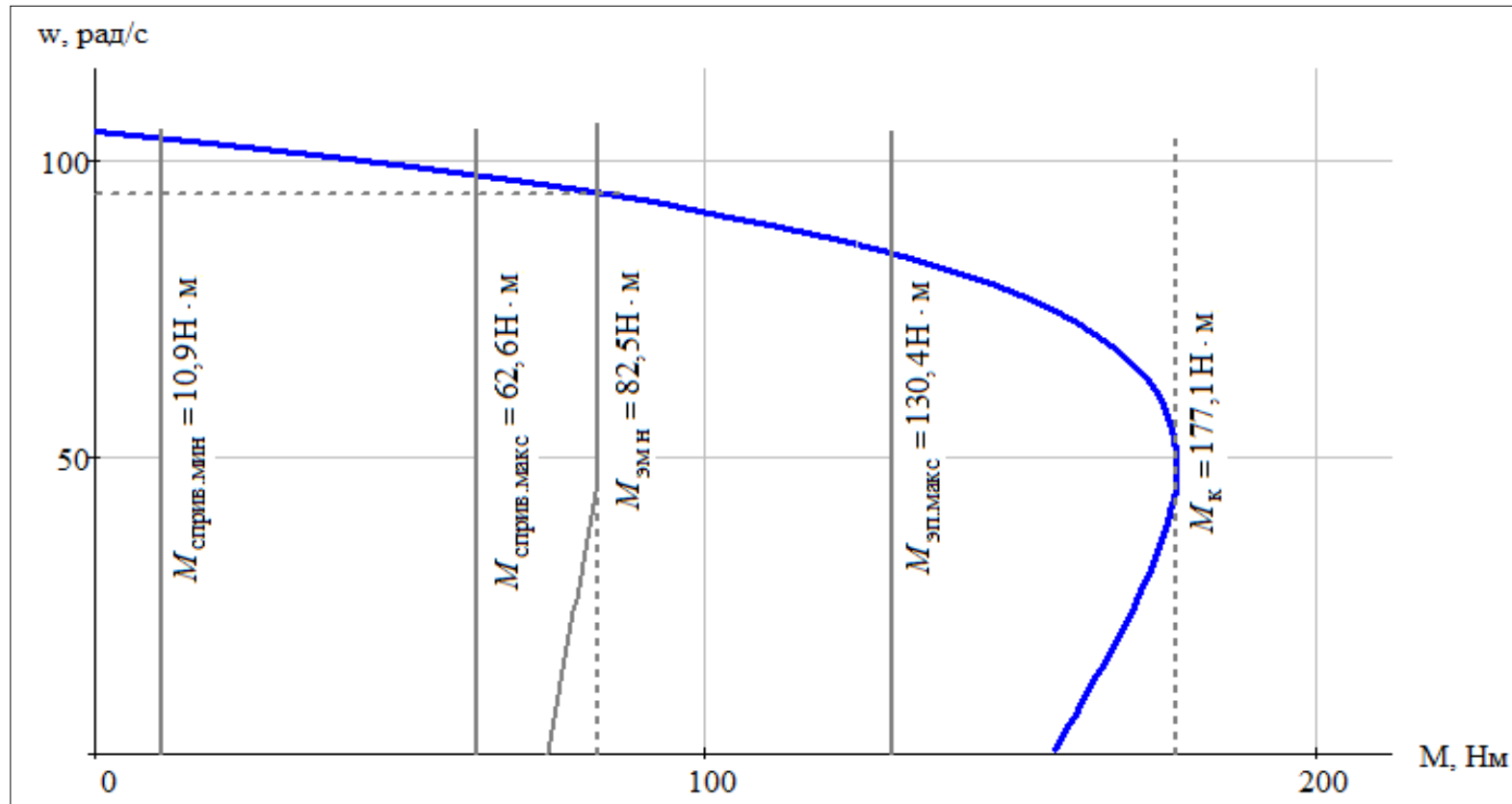
электродвигатель 1; муфта 2; тормоз 3; редуктор 4; зубчатая муфта 5; промежуточный вал 6; ведущее колесо 7

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором
АМТКФ132L6

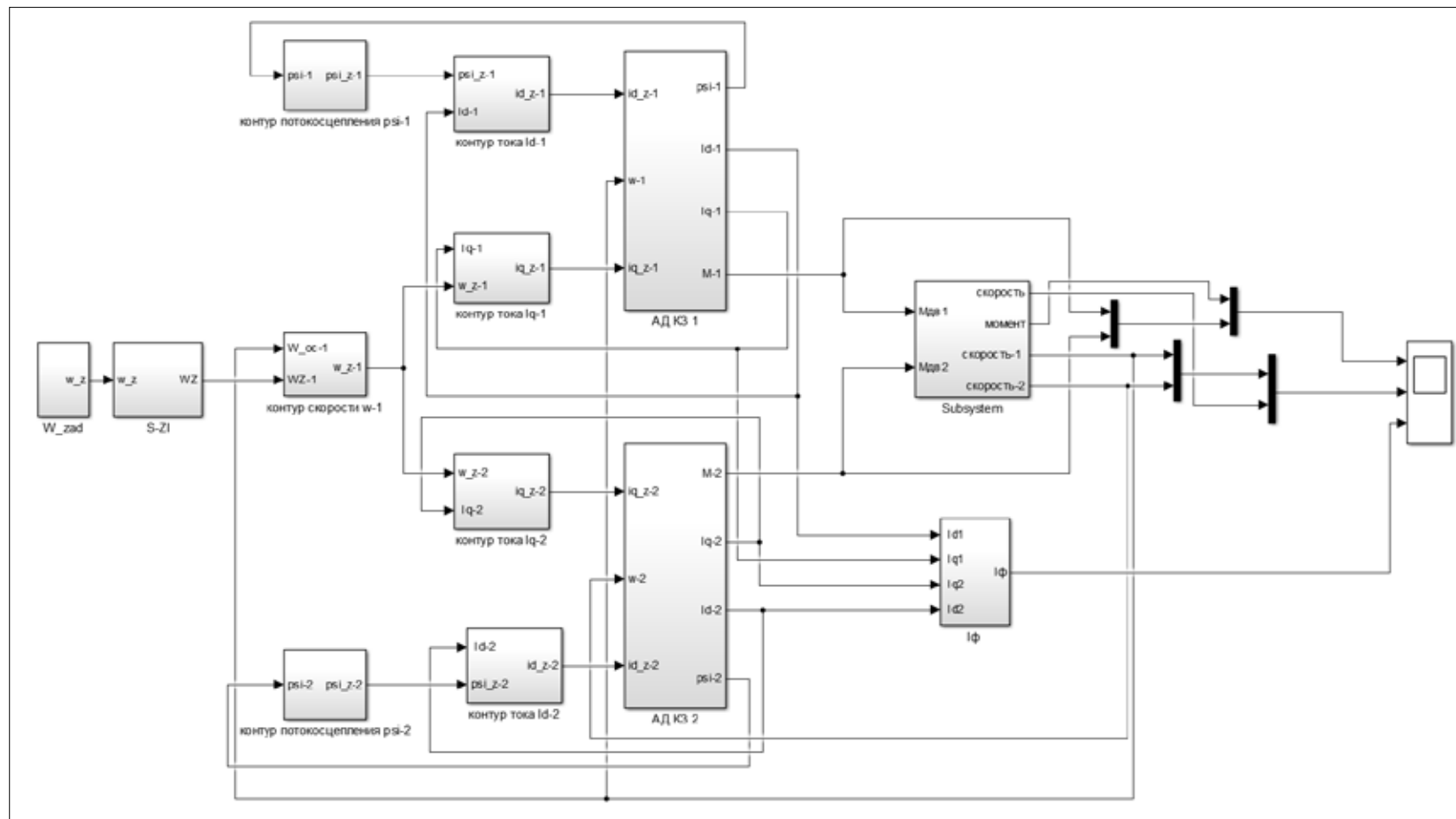


$P_H,$ кВт	$n_H,$ об/мин	$\eta_H,$ %	$\cos\varphi_H$	$J,$ кг·м ²	$s_H,$ %	$m_{\Pi},$ о.е.	$m_K,$ о.е.	$k_i,$ о.е.
7,5	900	87	0,87	0,085	10	2,2	2,2	4,2

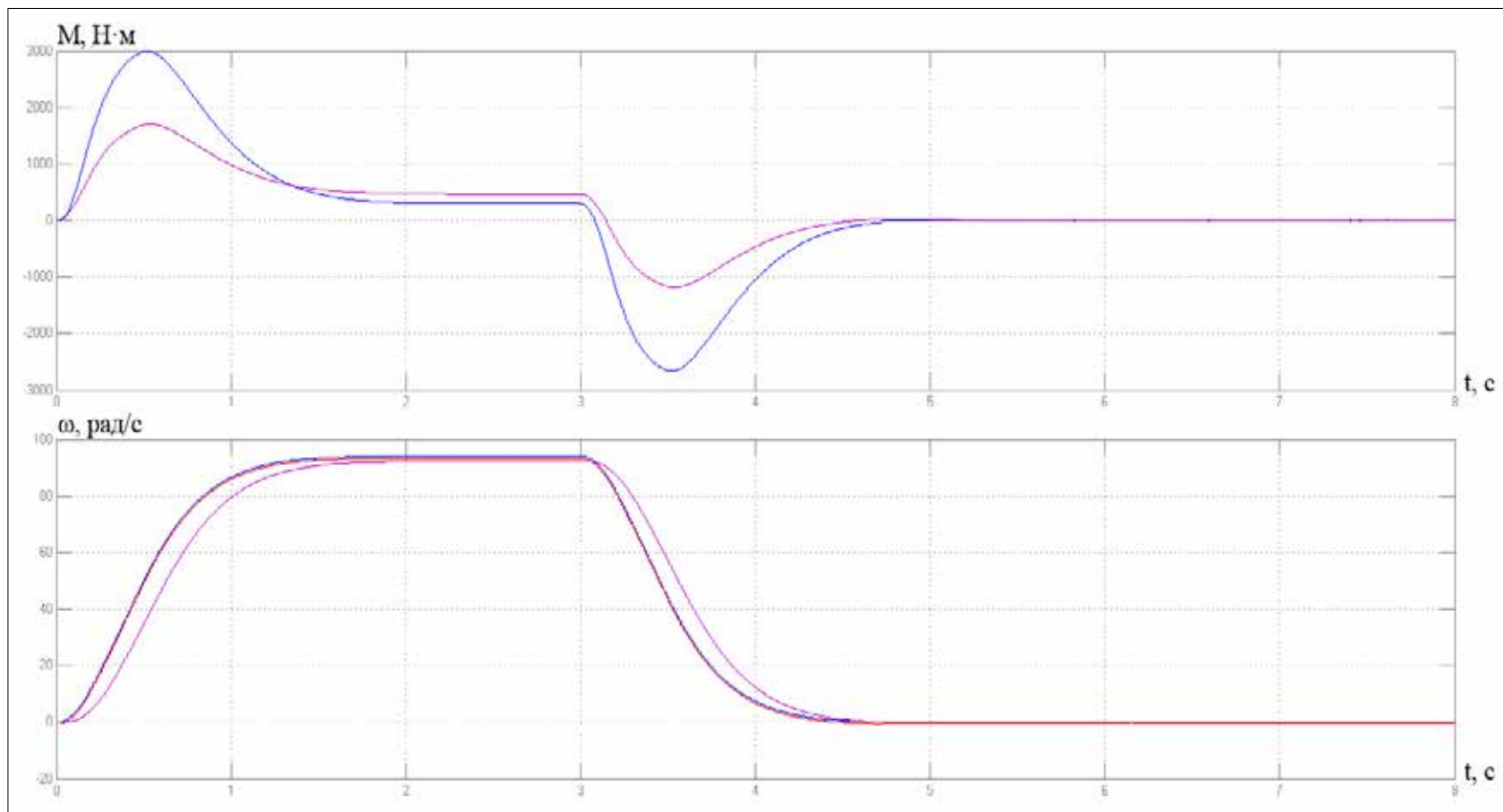
Механические характеристики асинхронного двигателя и нагрузки



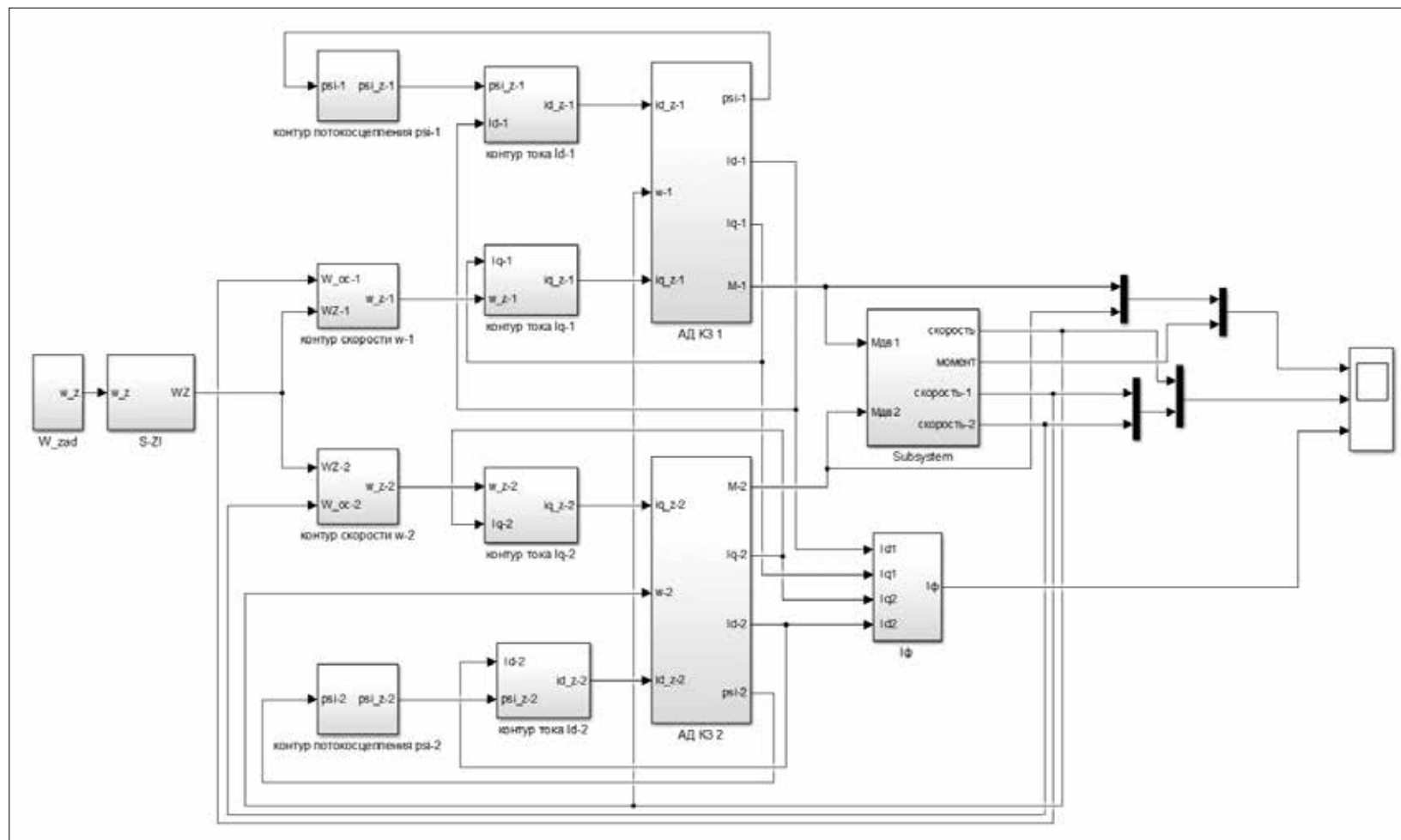
Имитационная модель двухдвигательного электропривода при векторном управлении



Динамические характеристики двухдвигательного электропривода
 $M = f(t)$ и $n = f(t)$ при векторном управлении



Имитационная модель двухдвигательного электропривода при векторном управлении с обратной связью для каждого двигателя



Динамические характеристики двухдвигательного электропривода
 $M = f(t)$ и $n = f(t)$ при векторном управлении с обратной связью для
каждого двигателя

